[辅控系统]

辅控系统试验方法及测试平台的研究与设计

文/宿为　商佳文　徐梁　王煜
国网电力科学研究院有限公司

随着电力行业的快速发展和智能电网建设的不断推进，国家对变电站的安全、稳定与高效运行提出了更高的要求。变电站辅控系统作为变电站的核心组成部分，需实时监视电力设备的运行状态并联动控制辅助设备。辅控系统的鲁棒性、快速响应能力及功能完备性对变电站运行效率和供电可靠性具有关键作用。因此，对其进行全面、深入的测试至关重要。通过研究变电站辅控系统现状，设计系统试验方法，分析辅控系统测试平台功能要求，基于Winform架构研发测试平台，并采用Petri网对平台界面逻辑进行严苛的建模与仿真。该测试平台实现辅控系统各模块接口的标准协议对接，具备关键参数的灵活配置功能，提升系统功能的检测灵活度与检测效率，是保证即将入网的变电站辅助设备监控系统质量的可靠手段。

变电站肩负着转换电压、变换功率和分配电能的重要功能，是电网不可分割且极其重要的一部分。确保变电站能够长时间运行在稳定、安全的状态，可以极大地保证电网的安全可靠[1]。在变电站的整体建设中，变电站辅助设备监控系统是站内设备正常工作的基础，是实现整个变电站稳定运行的重要前提，也是实现数字化、一体化变电站测控体系的重要环节。但目前仍有大量变电站的测控体系落后于国家电网建设标准，在长时间的运行中逐渐暴露出数据准确性差、信息无法实时共享、主辅设备联动脱节和人工安全隐患等诸多问题[2]。究其原因，是变电站辅助设备监控系统的功能欠缺和性能受限所致。所以，变电站辅控系统质量检验检测环节的重要性日益凸显。本文通过研究变电站辅控系统现状，设计系统试验方法，分析辅控系统测试平台功能要求，基于Winform架构研发测试平台，并采用Petri网对测试平台界面逻辑进行严苛的建模与仿真。为变电站辅助设备监控系统把好软件质量关卡，助力智能电网建设事业，助力实现“双碳”目标。

辅控系统现状

国外主流电气设备公司ABB、西门子和AREVA等，都注重于数据信息的采集，通过感知设备的状态，总结出规律，从而提高事故预防能力[3-5]。有的国家致力于研究智能控制开关，提高变电站监控设备的智能化程度，减少人力成本[6]。国内变电站发展经历了传统变电站、综合自动化变电站、数字化变电站以及智能变电站，现阶段正处于智能变电站阶段[7]。2009年，国家电网首次公布了智能电网发展计划[8]，该计划促进了智能电网发展框架的确定和示范点的搭建。经过多年的发展，智能变电站已具备智能、自主及敏捷等优点，与之配套的辅控系统框架经过迭代发展，能够满足其高协同需求。辅控系统通过对变电站内一次设备在线监测、安防监控、消防监控、动环监控和智能锁控

等设备的信息共享、应用功能集成、操作及告警联动，为变电站综合监控提供辅助支撑[9]。当前智能变电站系统整体架构如图1所示。

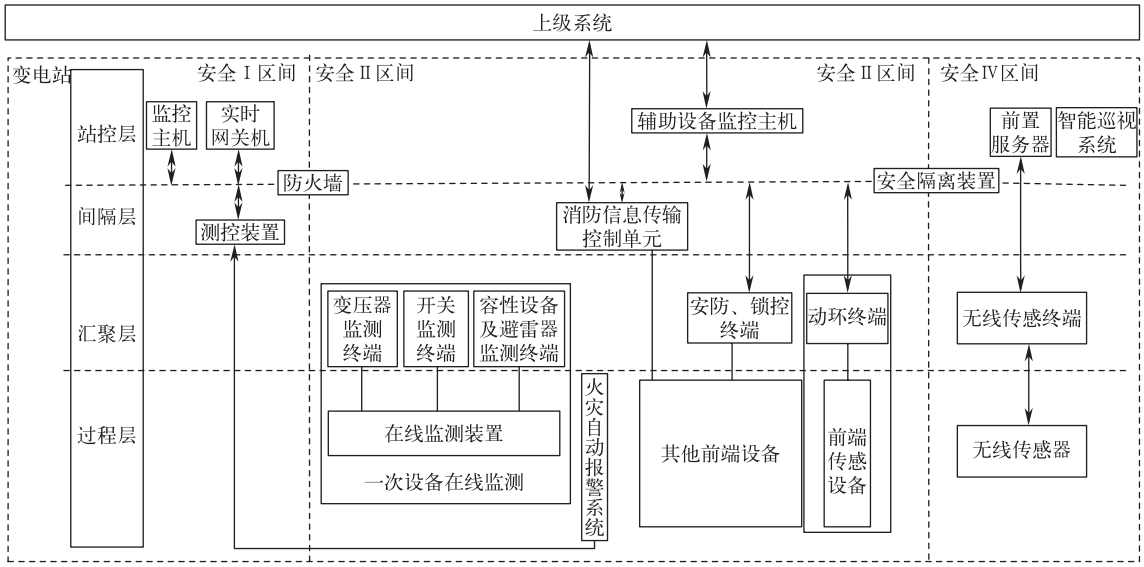

图1　智能变电站系统整体架构

试验方法设计

1. 接口拓扑分析

辅控系统的总体试验思路是采用模拟对象接入验证的模式，仿真变电站中所有的遥信、遥测、遥控、遥调数据或者以CIM/E格式文件作为数据载体，与被测辅控系统进行数据与文件的交互，对功能项目逐条进行验证，最终达到对辅控系统功能与性能的质量监督与控制，为电网的智能调控与稳定运行提供坚实的质量认证基础与技术服务保障。辅控系统功能性测试全程采用黑盒测试法[10]。为了全方位、高质量开展辅控系统功能性的检验检测工作，团队先对图1中变电站系统架构进行深入研究，并通过标准协议分析，完成接口拓扑图，如图2所示。辅控系统的接口可以简化为五个部分，分别是其南北向接口、与主设备监控系统的单向通道、与巡视设备监控系统和无线传感前置服务器的双向通道以及接入监控终端的南向接口。通信接口协议、硬件通道、通信方向与通信端的关系见表1。

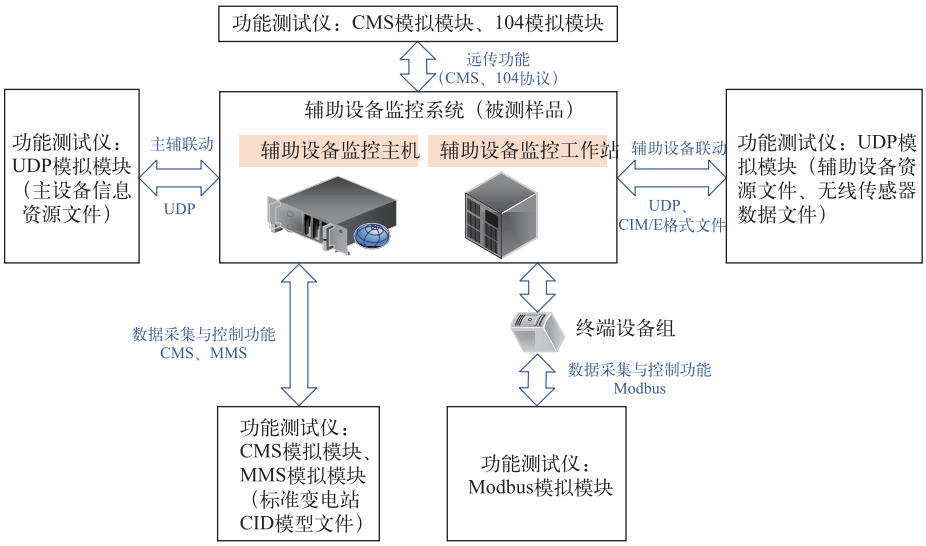

图2　接口拓扑图

表1　辅控系统接口协议

发送端	接收端	协议类型	硬件通道	通信方向
主设备监控系统	辅助设备监控系统	UDP	网口	单向
辅助设备监控系统	巡视设备监控系统	UDP	网口	单向
巡视设备监控系统	辅助设备监控系统	隔离装置的文件摆渡功能，文件采用CIM/E格式	网口	单向
辅助设备监控系统	上级系统	CMS、MMS、104	网口	双向
辅助设备监控系统	监控终端	CMS、MMS	网口	双向
监控终端	前端设备	Modbus	网口、RS-485	双向

2. 试验环境构建

试验回路搭建如图3所示，由被测辅控主机和辅助试验设备构成，辅助试验设备有监控终端、隔离装置和交换机等。交换机接入无线路由，简化有线通信连接拓扑，以支撑测试平台无线化调试与检验检测工作，避免因接入的其他辅助设备过多而导致试验现场混乱等引起的网络通信故障。

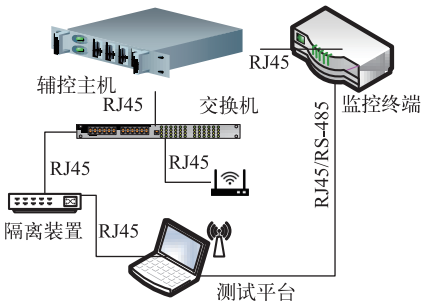

图3　测试环境

测试平台需求分析

测试平台符合多个标准变电站通信协议，主要用于变电站辅助设备监控系统功能及性能的检验检测工作。平台由5个核心模块及综合合成模块构成，各模块的功能研发需求见表2。

表2　测试平台研发需求

模块及类别描述	功能需求
综合模块	具备软件使用准入licence验证功能
	具备所有功能测试软件的入口集成
	具备所有功能软件的更新检查及自动更新功能
	具备管理员模式
	在管理员模式下，应具备各功能模块的编号、名称、版本号的集中管理功能
	具备最小化及悬浮框展示功能
通用需求	具备良好的人机界面
	有明确的通信连接状态展示
	具备按照遥信、遥测、遥控、遥调的参数类型分别展示
	具备手动打开通信连接、手动断开通信连接、断线自动重连功能
	具备文件交互功能块，实现文件传输专用通道
CMS服务端模块 MMS服务端模块	具备自动解析终端CID模型文件并主动与辅控主机连接的功能
	遥信及遥测量值应具备人工置数功能，支持批量置数并上传或单个置数并上传
	能接收被测系统下发的遥控及遥调指令
	支持自定义关联遥信信号与遥控信号，具备批量和单点两种关联方式
	支持雪崩测试功能块
104客户端模块	支持载入上级系统的监视点表，并根据点表内容，按四遥数据类型自动更新绘制界面
	具备遥控及遥调参数的人工置数功能
	能接收被测系统上传的遥信及遥测量值
Modbus服务端模块	支持载入的前端设备点表，并根据点表内容，按四遥数据类型自动更新绘制界面
	遥信及遥测量值具备人工置数功能，支持批量置数并上传或单个置数并上传
	能接收被测系统下发的遥控及遥调指令
	能自定义切换通信模式，具备TCPModbusS和Modbus两种通信模式
	支持通信报文结构大端、小端自定义配置
UDP测试模块	具备CIM/E格式化文件载入与自动解析功能
	允许根据主设备监控对象类型，自定义信号分类功能
	具备UDP控制报文发送功能
	支持用户自定义发送端及接收端的ip地址及端口
	支持报文及操作日志记录

测试平台软件设计

1. 开发环境选择

该平台应用在Win10及以上操作系统中，由于开发时间紧迫，需要选择能够快速搭建系统架构完成研发的编程环境及UI交互体验良好的高级编程语言。本文采用Visual Studio 2019版开发工具和C#高级程序语言。VS2019安装完毕无需复杂配置，即可获得Windows应用环境，提高调试与后期测试效率，降低人力成本。C#程序语言可以快速构建测试平台软件界面，且其所拥有的各类控件与Windows原生系统有较强的关联度及相似度，保证较高开发效率的同时也能获得相对人机交互界面。

2. 系统架构设计

测试平台系统架构自顶向下，采用五级架构，总体可分为用户级、中间业务级、底层操作级、资源级和助手级，如图4所示。

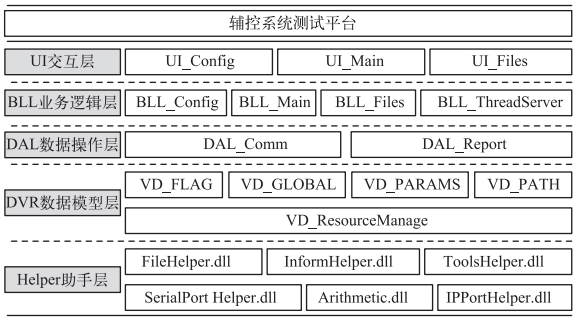

图4　平台架构图

用户级引用CSkin皮肤控件包，总有比自带控件更加丰富的属性与方法，提升使用体验。用户级内细分为同步层和异步层。在执行过程中，同步层会阻塞主线程，异步层将跳转至后台与主线程并行执行，提升效率与界面观感。

中间业务级用于处理界面前端的数据合理性校验，以及将通过校验的数据按照定义的结构类型，完成储存及展示功能。

底层操作级主要实现与外部存储部件的交互，解耦助手级与中间业务级，关联资源级，提升系统模块化设计水平，增强系统鲁棒性。

资源级是数据介质，存储结构化的类型数据以及核心资源，集中式管理，规避空指针和内存泄漏等性能风险。

助手级引用动态链接库工程生成的*.dll库文件，即黑盒方法库，仅提供形参输入接口和实参返回值，更新库工程编译后，可以实现引用工具库的同步更新。

3. 平台界面设计

平台界面设计总体遵循4区设计原则，顶部多功能快捷操作部件和底部状态栏部件，中部左侧树选择部件和中部右侧的主信息显示区。

Petri网建模与仿真

软件平台研发过程中，为了提高系统的鲁棒性，减少系统潜在的逻辑死锁、竞争等性能问题，在平台业务逻辑设计中采用Petri网建模仿真的模式[13-15]，优化系统逻辑设计。所有测试仪的Petri网建模过程一致，本节以MMS协议模拟测试仪主逻辑为典型，进行Petri网建模，模型如图5所示，各元素含义见表3。模型构建完成后，采用random模式对该模型进行系统仿真，模型仿真初始条件为库所P0～P2均具备一个Token。图5中橙色变迁代表仿真流程的下一帧可选变迁阵列。

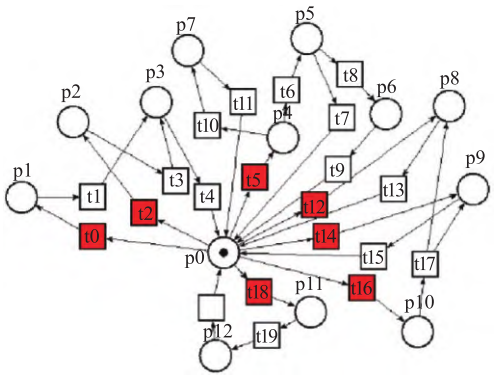

图5　MMS协议模拟测试仪逻辑Petri网模型

表3　Petri网模型对应库所及变迁定义

库所	含义	变迁	含义
p0	MMS协议模拟测试仪主检测界面	t0	选择CID文件
p1	CID文件选择域	t1	确定CID文件
p2	SCD文件选择域	t2	选择SCD文件
p3	通信网卡选择器	t3	确定SCD文件
p4	装置参数操作域	t4	确定网卡选择
p5	条目操作域	t5	鼠标进入模拟装置选择域，并选择装置
p6	置数、变位操作界面	t6	鼠标右击
p7	YX、YK关联配置界面	t7	鼠标离开条目操作域
p8	遥信类参数域	t8	多选、人工置数、人工变位
p9	遥测类参数域	t9	确定置数或变位操作

（续）

库所	含义	变迁	含义
p10	定时发送遥测、反转遥信配置操作域	t10	YX、YK关联配置
p11	雪崩测试配置域	t11	确认或取消关联配置
P12	雪崩测试进行进度展示域	t12	选择信号类标签页
		t13	发送YX监视报文
		t14	选择遥测类标签页
		t15	发送YX监视报文
		t16	定时配置
		t17	确认定时配置
		t18	配置雪崩
		t19	确认雪崩配置
		t20	雪崩发生次数计数递减归零

仿真结果显示，检测平台主逻辑设计无死锁，无竞争，验证该检测平台设计无业务操作逻辑缺陷。

结束语

本文以变电站辅助设备监控系统的测试方法为研究对象，基于部件特点，设计硬件回路搭建方式，采用C#高级编程语言，Winform开发架构，设计并开发了一套综合检测平台。该平台采用五层架构设计理念，有效地实现了变电站辅助设备监控系统功能及服务器性能的自动化检测。在检测平台的开发过程中，采用Tina Toolbox建模与仿真工具，对平台业务处理逻辑建立模型并仿真分析，消除研发过程中逻辑死锁、业务竞争等逻辑设计缺陷，提高系统运行稳定性。仿真验证结果表明，本文设计研发的检测平台能够与变电站辅助设备监控系统主机及工作站建立稳定连接，进行指令交互与数据采集、分析功能，创新变电站辅助设备监控系统的检验检测方法，有效提升检测效率和准确性，消除人员差异性因素影响，在同类系统类产品检验检测领域，具备一定推广价值。EA

（收稿日期：2024-08-22）

参考文献

[1] 王汉林．基于物联网的变电站辅助设备监控系统的设计[D]．恩施：湖北民族大学，2022．

[2] 杨金淞．高压变电站辅助设备智能化控制系统设计[D]．武汉：长江大学，2023．

[3] 于传英．ABB公司的智能化变电站 [J]．高压电器，2000(4)：62-63．

[4] 西门子为GlitreEnergiNett建设支持电力物联网应用的数字化变电站 [J]．电气应用，2019，38(10)：2．

[5] 常惜阳．智能变电站发展现状与趋势的研究 [J]．电工技术，2019(20)：63-65．

[6] 何志鹏，郑永康，李迅波，等．智能变电站二次设备仿真培训系统可视化研究[J]．电力系统保护与控制，2016，44(6)：111-116．

[7] 胡斌，郭亚飞，杨彬，等．智能变电站技术的现状与发展趋势研究[J]．智慧电力，2018，46(3)：87-90．

[8] 张瑶，王傲寒，张宏．中国智能电网发展综述[J]．电力系统保护与控制，2021，49(5)：180-187．

[9] 宿为，李韦江，商佳文，等．辅控传感设备协议检测平台的设计与实现 [J]．电气时代，2023(9)：69-74．

[10] 刘德寅，薛小东，张舒白．计算机软件测试技术与开发应用研究 [J]．电子质量，2018(7)：5-6+31．

[11] 王怡东．基于C#的离子迁移谱上位机软件设计实现[D]．西安：西北大学，2021．

[12] 张松琛，温勇，李小花．基于C#的综合监控校验系统[J]．工业控制计算机，2022，35(2)：24-25．

[13] 冉宁，寇梦娇，郝真鸣，等．一种基于Petri网的无人机物流配送建模方法[J]．电子测量技术，2022，45(15)：90-99．

[14] 宿为，万军，赵不贿．问题监控快速响应系统的Petri网建模与设计[J]．信息技术，2017(2)：20-24，28．

[15] 宿为，李韦江，商佳文，等．辅控传感设备协议检测平台的设计与实现[J]．电气时代，2023(9)：69-74．