

「继电保护」

基于Python和Robotframework的 继电保护装置自动化集成测试方法

文/西门子电力自动化有限公司 周 寻 赵吉生 官建涛 王 浩 朱来强

利用Python和Robotframework统一管理以及测试多种选型的继电保护装置，使得保护装置的系统测试、集成测试、回归测试、现场故障重现和调试更加灵活和高效。此系统集成通信自动化测试，保护功能自动化测试，装置网页自动化测试，固件的自动化下载，装置故障记录自动读取，轻量级测试用例自动化回归，测试过程中错误信息以及最终测试报告的邮件自动化通知等全套的自动化测试环节。实现了真正的无人值守时候完成多装置在不同接线方式下的自动化测试工作。真正做到好管理，好配置，易操作，测试结果不分散，测试用例不混乱，测试对象更全面，节约人力节约时间等高效的实用价值。不同的装置类型都可以定制出适合于它们的自动化集成测试框架，将以西门子7SJ58保护装置为例展开详细说明。

电力工业在现代化进程不断深入的背景下得到了长足发展，电网的规模也逐渐扩大，为此，电力系统也逐渐成为国家现代化建设的重要前提。其中，继电保护是二次设备，使得电力系统运行更加安全与稳定。因此，继电保护装置在开发过程中的各方面的测试也成为了重中之重。繁多的对象装置选型，复杂的测试场景，庞大的测试用例，众多的功能测试点，对于每轮测试的覆盖率、一致性、准确性和可复用性都有着极高的要求。Omicron作为高精度、高扩展性的专业可编程自动化测试仪，在继电保护装置的保护功能测试环节扮演了很重要的角色。此外，Robotframework采用关键字驱动技术作为其核心，使得该框架具有良好的独立性及可扩展性。它是基于Python语言开发的开源的自动化测试系统，具有简单明了的上下级结构，可灵活重用的KeyWord，独立于平台和应用，友好的中文变量定义，可自定义关键字等优势。在有更高级需求时，还可以通过Python来自定义库供其使用。给

整套的继电保护装置的自动化测试系统案例管理提供了很好的支持。

对于继电保护的测试而言，分为保护功能测试、通信规约测试、配置工具测试、系统稳定性测试、版本兼容性测试和压力测试等几大部分。在装置开发过程中又分为好几个阶段，每一个阶段的测试侧重点又完全不相同。比如在开发过程中，每一个新功能的出现，都需要对老功能进行迭代性的测试。在最终开发版本出来之后，又需要进行集成测试，系统测试，等等。另外，由于装置的选型繁多，各保护装置具有的功能又不尽相同，每一次测试前又需要对不同装置的物理接线进行调整，这些必不可少的环节都需要一个集成度更高，效率更高，测试范围更全面，自动化程度更出众，并且不需要频繁调整接线的测试系统，用来在每一个环节，对每一个版本进行全方位的系统验证和把控。

在这样一个高强度、短周期、少人力且节省资金的测试前提下，一套完整的测试系统搭建就

显得尤为重要。以下就对此需求提出行之有效的解决方案。保证了在无人值守的情况下，对保护装置进行全方位的自动化测试行为。将以西门子7SJ58本地化综合保护装置为例，进行详细介绍。

7SJ58综保装置简介

本保护装置总共包括纯过流馈线保护、标准馈线保护、电容器保护、站用变保护和PT柜保护5种选型。其采用ROHS认证的无铅工艺设计制造而成，并满足最新的A类严酷电器环境的最高等级标准。7SJ58装置（5U设计）根据选型分别包含4VT、4CT（或5CT）、9开入、6开出和7LED的配置，并含有选配的3路测量CT，直流操作箱，加上T103，MODBUS（RS485）规约以及符合标准的各类保护功能、测量功能和监视功能等。另外，网页式灵活的组态配置模式也是此装置的亮点之一（在测试环节也起到了重要的作用）。现已在中低压市场广泛投入使用。其安全稳定的运行状态，都将归功于这一整套完整的自动化测试系统。下面将介绍对于此类产品的具体测试解决方案。

测试系统的物理搭建

在所有测试开始之前，搭建一个完整的测试系统是至关重要的，它决定了以后的测试方案的实施是否可被有效执行。对于西门子7SJ58继电器保护装置，搭建如图1所示的物理接线示意图。此测试系统包括5台不同选型的继电器保护装置，1台USB转多串口设备，1台以太网交换机，1台模拟断路器，1台Omicron 256 plus测试仪（含ISIO200BIBO扩展模块），2台110 V直流电源，以及多组凤凰端子。其中，所有流过装置保护CT的电流串联连接（测量CT同理），电压则并联在各装置的PT上；同时，每台装置的开入、开出都分别并联在一起接入同一台Omicron保护测试仪。每一台7SJ58装置都配有自己独立的电源开关，并将所有装置的操作箱并联后，统一接入一台模拟断路器，方便对操作箱的一系列操作和测试。7SJ58继电器保护装置是一台支持网页配置（所有定值读写，实时值和状态量读取，BI/BO/LED的灵活配置，参数导入导出，录波下载等），串口规约通信（Modbus/103）以及串口升级固件等功能的综合保护装置，所以此测试系统需将每台装置

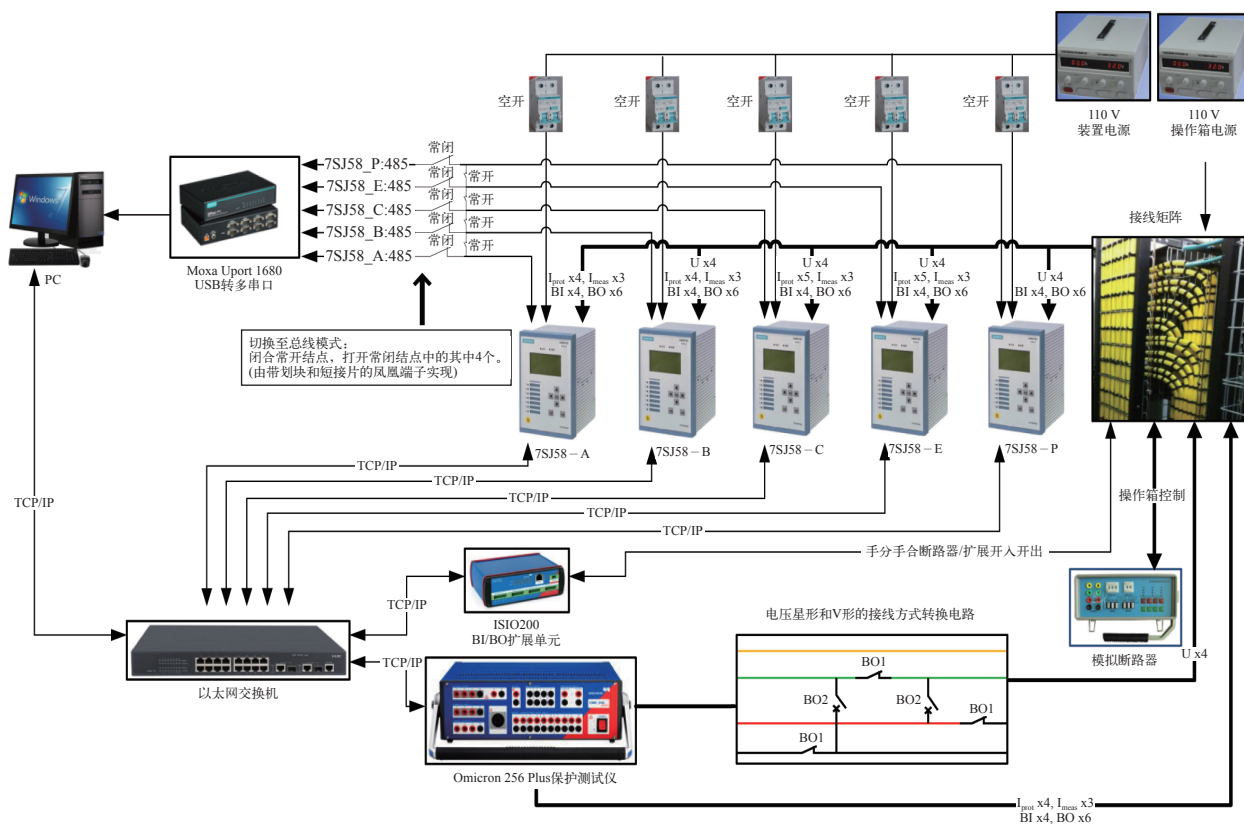


图1 物理接线示意图

的网口、Omicron保护测试仪及计算机都连接到交换机并设在同一网段。此外，此系统支持对于电压接线方式星形与V形的自动化切换功能。其次，带拨片的凤凰端子，可以方便地将单串口对单装置的通信模式很快转变为单串口对多装置的RS485总线模式。

物理模型的搭建旨在如下原则。

1) 将所有待测装置的模拟量通道，开入开出量通道都可以通过同一台网口Omicron进行集中控制。

2) 所有装置和网口外设（网口Omicron）通过同一交换机接入PC，实现单PC可配置所有保护装置以及控制网络外设。

3) 所有装置通过串口集线器接入同一台PC，实现单PC可测试不同装置的串口规约。

所有的物理硬接线一旦连接完成，可避免日后测试时其他任何二次接线过程。让整套系统架构完全固定，直至此产品生命周期终止。

测试系统的数据流

物理接线完成之后，软件对这个系统的控制

将成为整套系统运行的核心，如图2所示（本系统设计思路是由Robotframework主要管理详细测试案例以及报告的生成；Python则作为总调度控制台以及用来实现Robotframework的自定义库编写工作。因为Robotframework是Python衍生出的自动化测试框架，也就是说，Robotframework的运行也是基于Python实现。所以，下文将不再严格区分二者的使用场景）。将对此系统中一些非常重要的核心自动化环节做详细介绍。

此系统具有如下几种自动化测试模式。

1) 监控装置新版本的生成，并自动下载到每一台装置。

2) 对不同的电压接线方式用Omicron的OCC模块进行保护功能的测试。

3) 基于西门子SICAM PAS通信管理前置机的通信自动化测试（包括遥控、遥信、遥测及103定值读写等）。

4) 每周定时对每台装置的故障记录进行监视和读取。

5) 对于各装置的网页配置工具的自动化测试。

6) 对于测量值，电度量准确率的自动化测试。

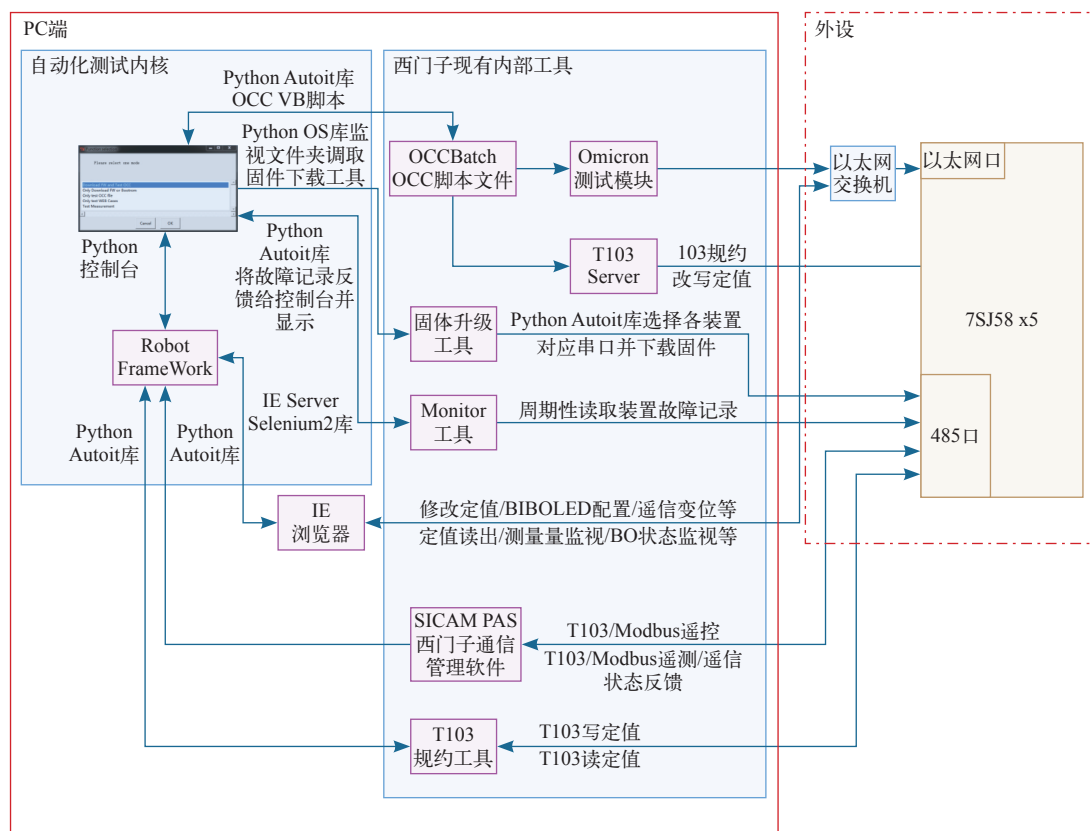


图2 测试系统

7) 对于装置软件版本兼容性的测试。

8) 所有测试报告的导出,并以邮件转发给项目成员。

此系统也可进行各项手动测试,比如操作箱和模拟断路器之间的测试,通信规约485总线运行情况,手跳手合操作,各种现场故障导出的录播文件通过Omicron回放,一些极端测试等。手动测试在这套系统上进行的最大的好处在于,测试了更全的装置选型,大大降低了临时的接线耗时等。总而言之,一切的继电保护装置的测试都可以在这个集成系统上进行,不需要再借助任何其他额外的设备。

1. 版本监控以及自动化下载

在所有测试开始之前,第一步需要对固件版本做到实时的监控,并在发现待测版出现后下载到装置。本系统通过Python的os库实时监控开发人员生成固件的文件夹,一旦发现匹配的固件程序,Python将会调取下载固件的内部工具,通过PyAutoIt库选择不同的串口号以及串口信息将固件逐一下载到系统中的每一台装置中。在下载过程中,持续监测下载进度条,以及是否有错误产生的弹窗。如果有,将会将装置串口号以及弹窗中显示的错误信息通过smtplib库调取邮件服务器发给指定人员,告知其下载过程出现异常。

2. 保护的自动化测试

如果所有装置的固件版本下载顺利,将会进入到下一环节——调取OCC Batch (Omicron自带的批量运行OCC测试脚本的工具)进行大批量保护功能的相关测试案例的运行。在运行之前,测试脚本中对于保护功能参数的不同取值来进行测试的问题也就呼之欲出。Omicron中的OCC文件也只能做到设计一些脚本去自动化施加模拟量,但是做不到与继电保护装置之间的数据交互。这时需要用Python编写一个模拟103 Server的应用程序,通过OCC提供的调取第三方应用的模块,给103 Server传入对应的装置串口号,以及修改定值的报文,做到通过103规约对保护装置各定值的修改。定值修改完毕后,加入OCC自带的保护测试模块(例如状态序列、电压电流递变、差动、重合闸和录播回放等,对于西门子保护装置而言还有很多西门子自编写的模块可供选择)进行所有保护功能的测试。

在星型电压接线方式下测试完所有案例以后,需要对V形电压接线方式进行与电压相关的

保护测试,此时如果无人值守在计算机旁,将无法进行物理接线的变更。只有等到相应测试人员前来对接线进行调整,才能继续进行。这种情况将导致测试效率和进度大打折扣,此时图1框中电压接线方式的自动化调整将弥补这一缺陷。如图1所示,此时只需将常闭的BO1打开,常开的BO2闭合,将会自动切换到V形接线。此过程的具体实现是利用额外一台7SJ58的保护设备的开出节点并配合非电量保护,通过自动修改网页中非电量保护的开入量的高/低电平有效的方法来实现非电量保护对应的开出节点自动切换BO1和BO2的开合(当然这个过程也可以更简单地用1个接触器的多对常开/常闭节点来实现)。

当待测装置做完所有保护功能的测试之后,在最后一个OCC文件里嵌入一段VB脚本,目的是用来写入结束标志到一个文本文件,Python将用一个独立线程来对此文件进行持续监视,一旦发现结束标志,将立即得知并记录下本装置已测试完成所有保护功能,并为下一台装置的测试做准备,而后切换到下一个装置的测试状态。之前提到,由于所有装置的开入、开出、电流和电压都同时接在同一台Omicron测试仪上,所以为了在保护测试时做到不互相干扰,Python在保护测试前会将非待测装置的所有保护软压板通过Robotframework的selenium2库从网页配置工具上做退出处理,对开出做不配置任何消息处理(同样可以用Python调取103 Server实现所有软压板的退出操作),做到在对于不同保护装置测试时,不受到任何其他非待测装置开出的影响,保证待测装置的测试准确性。

这样,在这个测试系统中,多台装置将可以在无需任何人为介入的情况下将不同电压接线方式下的所有保护功能不间断的全部完成。将传统的测试完一台装置→换线→测试下一台的测试模式,变为自动且不间断运行所有的装置选型的测试脚本。

3. 通讯规约的自动化测试

介绍完多装置的保护功能自动化测试后,通信规约的功能性测试一直是一个繁琐、重复度高、自动化程度低且覆盖率差的测试项目。以串口103规约测试为例,繁多的遥信、遥控、遥测以及定值读写条目想要做到完全覆盖需要花费大量的人力和时间。通常在每一个新版本生成后,也只是仅仅挑选其中的一部分做详细测试,对于剩

余的部分只做随机挑选的测试。这样就不能保证每轮测试的一致性和准确性。在这个自动化测试系统中，提出了对通信规约的功能性自动化测试的整套解决方案，有效改善了以上提到的问题。

所提到的通信自动化是一种不基于通信规约本身的测试方法。它是基于西门子通信管理前置机SICAM PAS的自动化测试方案（对于其他的通信管理机软件亦可以使用同样的方法）。对于遥信，测试最重要的关注点就是遥信条目在变位前后的状态。对于遥测，关注重点在于施加模拟量后，后台显示的值和所加的模拟量是否一致。对于遥控，则需要后台发出控制命令后，装置要有相应的开出动作以及反馈信息等。对于定值读写，则需要通过规约读取每个定值的值，再通过规约写入新的值并确保读写过程成功且准确。

图3是西门子SICAM PAS通信管理机软件的ValueViewer（也就是客户最关注的后台界面）图形化显示画面（以下简称PAS）。常规测试方法是测试人员需通过双眼关注条目名称以及该条目的实时状态；再触发遥信变位后，再次关注PAS中对应的遥信条目状态是否有相应改变，来人为证实此遥信变位成功。这个过程将会随着遥信条目的增多而带来大量的测试工作量。每一轮测试都将重复以上所有步骤。如果再加上遥测、遥控和定值读写，这将是一场浩大的测试工程。以串口103规约单条遥信测试为例展开详细说明。

由图3不难看出，保护总跳闸OFF是当前遥信的现有状态。此时，通过Robotframework给PAS发出命令将本条目对应的信息复制到文本文件中（PAS支持所有信息的导出），格式如下。

"2017/6/21 14: 16: 43.332"; "Valid, Process, ClockSync, ClockValid"; "";

"SICAM\ZXPC\IEC 60870-5-103Master\ Interface\58-E"; "0501_RelayTRIP"; "1"; "IrrelevantInitiatorCategory"; "GeneralInterrogation"; "DsiTestBitOFF"; "Valid";

可以发现导出文件的内容与后台图形界面内容完全一致，每个信息由分号隔开。那么，用Robotframework对文件内容进行解析并可以方便得到遥信名称（此处解析遥信名，得到用户号为0501）和遥信的状态（此处消息状态为OFF）。随后，利用装置网页中全遥信测试功能（由于不同厂家的通信管理机软件以及遥信触发方法不同。在此，只对测试原理和方法做描述，各厂家应按照实际情况设计测试方案），通过Robotframework的selenium2库，找到网页上对应的0501遥信点，并对0501遥信点的状态进行自动化修改及发送，如图4所示。

当遥信变位后，将会发现图形化界面的状态由1变位2，如图5所示，这意味着遥信点由OFF变为ON。

同理，Python控制PAS导出文本文件后，解析得到了此遥信变位后的状态也由1变位2，内容如下。

"2017/6/21 14: 16: 43.332"; "Valid, Process, ClockSync, ClockValid"; "";

"SICAM\ZXPC\IEC 60870-5-103Master\ Interface\58-E"; "0501_RelayTRIP"; "2"; "IrrelevantInitiatorCategory"; "GeneralInterrogation"; "DsiTestBitOFF"; "Valid";

Python可以清晰地判断出刚才所做的遥信变位已经成功，那么本条103规约的遥信点测试就成

TimeStamp	TimeSta...	Time...	ValuePath	ValueName	Value	Initiator...	CauseOf...	TestBit	Validity
(none)	(none)	(n...	(none)	0501_Relay TRIP	(none)	(none)	(none)	(none)	(none)
2017/6/21 ...	Valid, Pr...		SICAM\Z...	0501_Relay TRIP	1	Irrelevan...	Generall...	DsiTestB...	Valid

图3 西门子SICAM PAS通信管理机软件ValueViewer图形化显示画面

用户号	IEC103 Fun/Info	MODBUS Fun/ADDR	消息	状态	
0500	160/034	02/032	保护总启动	OFF状态	发送
0501	160/035	02/033	保护总跳闸	OFF状态	发送

图4 selenium2库中的0501遥信点

TimeStamp	TimeSta...	Time...	ValuePath	ValueName	Value	Initiator...	CauseOf...	TestBit	Validity
(none)	(none)	(n...	(none)	0501_Relay TRIP	(none)	(none)	(none)	(none)	(none)
2017/6/21 ...	Valid, Pr...		SICAM\Z...	0501_Relay TRIP	2	Irrelevan...	Spontan...	DsiTestB...	Valid

图5 图形化界面状态由1变位2

功完成了。Robotframework将会根据设计好的测试案例打印出此条测试的报告，如图6所示。

```
20170620 15:01:25.647 WARN 变位前值=1
20170620 15:01:25.648 WARN 变位后值=2
20170620 15:01:25.654 WARN 遥信测试#0501保护总跳闸#: PASS*****
```

图6 测试报告

以上所有步骤适合于所有遥信点的功能测试，不再一一赘述，只需使用For循环，重复以上步骤，便可以完成全遥信测试的自动化运行。同理，遥测的测试方法也与之相似。简要叙述其步骤，首先Python调取OCC Batch中用来给各通道加模拟量的OCC脚本文件，再从PAS导出加量后显示的数值和所加量进行比较，如果在允许误差范围内，那么遥测测试通过。遥控则由Robotframework控制PAS下发控制命令，再调取网页配置工具实时查询开出动作情况或者事件记录是否与操作相符（或使用Omicron抓取真实节点动作状态，通过OCC判断遥控是否成功。不支持网页配置工具的厂家，也可通过对应的遥信变位来判断遥控是否成功）。

对于103定值读写功能，首先需要结合一个103通信规约工具来收发通信报文。这里，通过前文提到的Python写的103 Server为例，来做读写A组过流保护定值的测试。第一步先通过Robotframework从网页读出A组过流保护的所有定值，存入一个数组。调取103 Server并下发读取整组定值的报文，并从返回报文中解析出对应条目的组号、条目号以及定值。如果报文中解析出的信息和网页上信息一致，说明103读过程成功。随后，从读上来的报文中将定值段的两个字节改写成其他值（组号和条目号不变），并配合写命令的报文发回给装置。再次通过网页读取A组过电流保护定值，比较网页现有值和写入值。如果结果一致，认为103写过程成功。经测算，此过程对于整组定值的103读写测试只耗时约5 s。换句话说，一个定值组15个保护功能，一共4个定值组，整体103规约定值读写全过程只需耗时约5 min。相比手动测试，效率和覆盖率都有很大提升（对于拥有自己103规约工具的厂家，更加缩短了所有步骤的复杂度，只需通过Python控制规约工具自动生成读写报文并下发即可）。

以上描述的通信自动化测试过程，不但测试了规约的功能，同样也间接测试了通信管理软件，还侧面测试了网页定值的显示。只有所有环

节都正确了，才会输出一个正确的结果。这种闭环的多维度测试，是测试领域最可靠的测试模式，这种多向的测试方法也将在测试行业逐渐成为主流。经统计，7SJ58装置的一轮完整的通信测试周期从3 d缩短至3 h，并且不需要任何人为介入。

4. 故障记录的周期性监视

西门子7SJ58继电保护装置在架构设计上对很多关键节点都配有Log信息，一旦装置在运行状态时发现异常，并符合了相应故障记录产生的条件，装置将会记录下此条信息供开发人员进行分析。虽然一条故障信息的出现并不意味着保护装置将完全停止工作，但一定意味着装置出现异常和隐患，更存在产生拒动、勿动或死机等严重后果的可能。作为测试人员，需时刻关注这个缓存区有无故障记录的生成，一旦发现，需立即通知开发人员进行检查和调试。为了确保这个查看故障记录的过程是周期性的，不被遗忘的，准确的，更不会因为装置太多而被漏查的，此自动化测试系统还加入了这一系列的自动化读取各台装置故障记录的解决方案。

对于7SJ58继电保护装置而言，有两种方式可以实现上述需求。一是通过网页配置工具输入密码后读取故障记录。二是通过西门子Monitor通用工具通过串口读取故障记录。首先通过Python的threading库开启多线程服务，在整套测试系统运行的同时，时刻读取计算机时间，并判断测试系统是否在运转。通俗来说，一旦系统发现计算机时间走到每周一5时，并且测试系统没有案例在运行时，将会启动故障记录读取并保存的任务。此时Python将通知Robotframework运行读取各装置故障记录的案例，对各IP地址的装置依次做打开故障记录链接对应的页面，如发现网页显示出装具有故障记录存在，将会立即通过smtplib库将装置的IP地址以及故障记录内容通过邮件发送给项目成员，做到了即使在项目结束后，此系统依旧能够持续监测装置运行状态的目的。当然，保护测试自动化、通信测试自动化和网页测试自动化等也可以随时随地地持续运行。

5. 网页配置工具的自动化测试

7SJ58装置是一款支持网页配置的继电保护装置。如图7所示，友好的网页配置界面和方便的操作模式，都给现场调试人员、后期维护人员带来了很大程度上的方便。但是，因为保护装置的重

要性，在网页配置过程中容不得半点失误，因此网页测试也成为了一个很大的测试点。上文已经提到了selenium2库，它是一款专门针对网页控件操作的库，通过对网页组件的先定位（Xpath、ID和Name等）再操作的工作模式对网页各个组件进行读、写、选择和判断等。然后，根据不同的应用设计测试案例，因为本文描述重点在于继电保护相关的自动化测试，这里不再详细对网页自动化测试进行大篇幅的描述，以下只对简单测试思路进行叙述。

此处以定值测试为例，首先定位并读出过电流I段定值的“范围”控件中的内容（selenium通过//div[@id="workArea"]/table/tbody/tr[3]/td[5]定位到图7中的对应控件），解析后得到可设定值的精度为小数点后两位，最大值为20.00 A和最小值0.05 A。然后展开正向和反向测试，正向测试是在该范围中取几个随机且符合精度要求的数

（最大值和最小值必测），下载到装置，读取到网页显示装置反馈的“操作成功”（同样可以通过Xpath对显示区域进行定位和读取）字样后，认为网页端正向测试成功，再配合OCC加量得到此定值是否真实被下载到装置当中。反向测试是输入范围以外的值以及精度以外的值，装置反馈给网页“修改定值无效”字样，且该定值条目能够保持最后一次修改成功的值，再配合OCC确认无效定值没有被下载至装置，得出反向测试通过，以此类推。

网页的应用在继电保护领域已经渐渐的在被认可和推广，所以网页测试配合技术应用也一定会在继电保护的测试行业逐渐成为重头戏。同样，如此之多的条目如果使用人工进行一一测试，显然是不现实且不全面的，基于Robotframework的网页测试方案将可以在3 d内完成100%的测试覆盖率。



图7 网页配置界面

结束语

针对对继电保护装置的测试方法、测试效率、测试自动化程度、测试覆盖率、测试案例一致性和测试结果准确性提出一整套继电保护装置的高集成度自动化测试系统解决方案。通过举例介绍西门子7SJ58继电保护装置的整体自动化测试解决方案，体现出继电保护自动化测试系统的重要性、高效性和它存在的意义。此系统具有前期准备周期短、后期人力成本低和投入产出比极高

等优点。继电保护厂家可以以本文为思路，设计出适合自己的自动化测试系统，将会使产品质量更可靠，同时还能降低测试成本。

本系统规约自动化测试方面是以规约的功能测试为主要测试目的，在通讯规约层面的测试还可以进一步提高，如下发错误报文请求等。EA

（收稿日期：2017.10.31）

（编辑：刘群彦）