

# 特高压直流控制保护程序智能校核软件设计

陈宏君<sup>1</sup>, 文继锋<sup>1</sup>, 谭林丰<sup>1</sup>, 吕鹏飞<sup>2</sup>, 孔祥平<sup>3</sup>, 王业<sup>2</sup>, 李鹏<sup>3</sup>

(1. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102; 2. 国家电力调度控制中心, 北京 100031;  
3. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

**摘要:** 分析了特高压直流控制保护程序的层次结构和组织模式, 将可视化页面的拓扑网络转换为有向无环图, 基于逻辑符号的位置信息和输入-输出的数据流关系, 形成可视化页面内符号执行顺序链表。依次对链表内符号进行特征信息提取, 汇总形成二进制中间信息文本, 计算中间信息文本的 32 位 CRC 作为校验码进行页面是否一致的地判据。基于特征信息提取的校验码方案可准确判断页面修改前后是否一致, 并能排除功能无关修改的影响。针对校验不一致的页面进行差异分析, 设计基于多个优先级判据的符号节点匹配算法, 构建节点匹配树, 标记符号新增、删除和差异状态。通过分层次、多维度的差异内容提取和关联定位展示技术, 实现特高压直流控制保护程序的智能校核和详细对比, 确保可视化程序修改和工程维护的一致性、正确性。

**关键词:** 智能校核; 可视化页面比较; 校验码; 节点匹配; 控制保护

## Intelligent check software design for UHVDC control protection program

CHEN Hongjun<sup>1</sup>, WEN Jifeng<sup>1</sup>, TAN Linfeng<sup>1</sup>, LÜ Pengfei<sup>2</sup>, KONG Xiangping<sup>3</sup>, WANG Ye<sup>2</sup>, LI Peng<sup>3</sup>

(1. NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China; 2. National Electric Power Dispatching and Control Center, Beijing 100031, China; 3. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

**Abstract:** This paper analyzes the hierarchical structure and organization mode of the UHVDC control protection program, converts the topological network of the visualized pages into a directed acyclic graph, and forms the symbolic execution sequence linked list in the visual page based on the positional information of the logical symbol and the relationship of the input-output data flow. The feature information of symbols in the linked list is extracted in turn, and the binary intermediate information text is aggregated to calculate the 32-bit CRC check code of the intermediate information text, which is used to determine whether the pages have the same function. The check code scheme extracted based on the feature information can be used to accurately determine whether the page is consistent before and after the modification and can eliminate the influence of the modification irrelevant to the function. For the analysis of discrepancies between pages with inconsistent checksum, this design matches the algorithms based on the symbol nodes of multiple priority criteria, builds a node matching tree, and marks the added, deleted, and difference states of symbols. Through hierarchical and multi-dimension content extraction and related positioning and display technologies, the design has achieved intelligent verification and detailed comparison of UHVDC control protection program to ensure the consistency and correctness of modification and project maintenance of the visual program.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5210EF180013) "Key Technical Research and Application for On-site Test and Operation & Maintenance Optimization of UHVDC Control and Protection System".

**Key words:** intelligent check; visual page comparison; check code; node matching; control protection

## 0 引言

特高压直流控制保护系统庞大的规模、丰富多

样的功能以及复杂的程序逻辑, 给特高压直流控制保护系统的现场测试、软件程序版本校核、故障分析等运维工作带来了极大的困难和安全风险, 不利于特高压直流输电工程的安全稳定运行<sup>[1-4]</sup>。目前特高压直流控制保护系统现场测试及运维优化关键技术的理论研究和工程实践存在以下突出问题需要解决。

**基金项目:** 国家电网有限公司科技项目 (5210EF180013) “特高压直流控制保护系统现场测试及运维优化关键技术研究与应用”

(1) 直流控制保护系统结构复杂, 功能逻辑不统一, 工程差异化大, 软件版本缺乏有效技术管控手段, 存在较大的安全隐患<sup>[1]</sup>。

(2) 缺少控制保护程序版本校核技术和手段, 无法检验程序修改的正确性。工厂内应用程序的仿真模型与现场修改程序不一致, 导致程序验收及管理存在漏洞, 给运维和检修工作带来很多不便。

(3) 直流控制保护程序普遍采用可视化编程工具的图形化开发的方式, 该方式将程序开发人员从繁琐的代码编写中解脱出来, 具有简单、灵活等优点<sup>[5-8]</sup>, 但当前的工具软件并不具备可视化页面差异分析校核功能, 仅靠人工检查, 无法保证可视化页面程序修改的正确性, 现场已发生过由于控制保护程序修改错误导致的直流闭锁问题。

(4) 可视化页面差异分析技术研究不够深入。随着数据挖掘和关联分析技术在智能电网的各种高级应用的逐步开展, 各个应用在围绕某一主题对电网数据进行分析时, 分析的结果往往不再是单一数据, 而是围绕主题、相互关联的多个信息侧面组成的信息多面体<sup>[9]</sup>。而当前对程序的差异分析对比研究主要成果是在文本代码和二进制产物差异方面, 它们的本质操作就是直接处理程序的源码或二进制可执行文件, 将其转换成一种更易于处理的表示形式, 从而确定相似度和分析差异<sup>[10-14]</sup>。对可视化页面程序的差异分析尚未有文献涉及, 如何通过可视化技术将差异信息呈现于视图中, 改善人员对可视化程序差异识别和认知, 是需要研究的课题。

针对上述现状与问题, 本文研究了控制保护可视化程序页面的特征提取方法, 能排除无效特征信息的影响, 实现页面一致性的准确判断。设计了符号节点匹配算法, 对可视化程序进行分层次多维度的差异分析, 并通过关联定位展示方法, 实现了可视化工程的智能校核。

## 1 技术原理分析

### 1.1 特高压直流控制保护系统结构

特高压直流控制保护系统分为三个层次: 运行人员控制系统、控制保护层和现场控制层<sup>[1-2]</sup>。

运行人员控制系统接收运行人员或远方调度中心的正常操作指令, 完成故障或异常工况的监视和处理、全站二次系统的同步和对时、控制系统参数的调整、换流站文档和程序的管理以及基本的培训功能等。

控制保护层设备接收就地处理层设备的状态信息, 进一步处理之后送到运行人员控制层显示, 同

时控制保护层设备接收运行人员控制层的命令, 送到就地处理层执行。

现场层控制系统的接口完成一次设备就地控制, 与近距离的主设备的接口通过硬连线进行; 与远距离的主设备的接口通过现场总线进行。就地控制接口由分布式 I/O 控制单元实现。

### 1.2 可视化程序的层次树和有向图

树和图论是数学和计算机科学中的重要研究内容, 计算机领域的复杂建模大多可以等效为树和图。

树是一种抽象数据类型结构, 用来模拟具有树状结构性质的数据集合, 它是由  $N$  个有限节点组成一个具有层次关系的集合<sup>[15-16]</sup>。把它叫作“树”是因为它看起来像一棵倒挂的树(根朝上, 叶朝下)。它具有以下的特点: 每个节点有零个或多个子节点; 没有父节点的节点称为根节点; 每一个非根节点有且只有一个父节点; 除了根节点外, 每个子节点可以分为多个不相交的子树。直流控制保护程序层次化组织是一个典型的树形结构。通过自上而下分层设计模式, 如图 1 所示, 组织整个装置的程序结构。

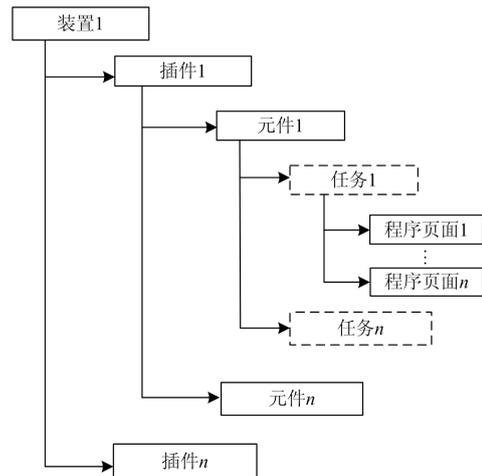


图 1 可视化程序层次树结构

Fig. 1 Visual program hierarchy tree structure

(1) 装置: 位于软件模型最上层, 包括硬件装置、处理资源、I/O 通道等, 通常等效于 1 个装置所需的软件和配置<sup>[7]</sup>。

(2) 插件: 位于软件模型的第 2 层, 为运行程序提供支持系统, 是能执行程序的处理手段, 反映了可编程控制器的物理结构, 为程序和物理输入输出通道提供界面和接口, 其中多核处理器的插件可运行多个独立的程序<sup>[6]</sup>。

(3) 元件: 是具备特定功能、面向对象的一组数据和对其进行处理的过程。元件包含若干任务和

对外的接口变量。

(4) 任务: 位于软件模型第3层, 用于规定程序组织单元在运行期的特性, 任务是1个执行控制元素, 具有调用能力, 可周期或事件触发执行。任务是个虚拟的层次节点, 任务队列的配置在元件的任务调度页面中通过可视化符号配置。

(5) 程序页面: 由符号和符号之间数据连线组成。一般在程序页面中定义变量, 通过绘制符号和连接线实现应用逻辑。

智能校核的基础工作就是获取可视化层次树结构, 针对不同节点类型, 提取其关键比较信息, 进行匹配对比。

图论中的图是由若干给定的点及连接两点的线所构成的图形, 这种图形通常用来描述某些事物之间的某种特定关系, 用点代表事物, 用连接两点的线表示相应两个事物间具有这种关系<sup>[17-19]</sup>。

用二元组 $(V, E)$ 表示图, 其中 $V$ 是图的顶点集, 它的元素成为图的顶点, 而 $E$ 是图的边集, 它的元素称为图的边, 用 $V(G)$ 表示 $G$ 的顶点集, 用 $E(G)$ 表示 $G$ 的边集, 一条边 $e=(u, v)$ 表示 $e$ 和顶点 $u, v$ 相关联, 称 $u, v$ 为 $e$ 的端点,  $u, v$ 是相连的。如果 $e$ 是有方向, 称为有向边, 反之称为无向边。每条边都有方向的图称为有向图。反之, 若对图中任意一条边 $(u, v)=(v, u)$ , 则称为无向图。

一个可视化页面内的符号和连线是一个典型的有向图, 基于数据连线依赖关系, 可以分析出符号的执行顺序, 符号的执行顺序是页面内节点匹配的重要依据。

### 1.3 可视化页面一致性校验

由于可视化页面内记录了符号的位置信息, 稍微移动符号, 或增加注释信息, 均会修改页面文件内容, 故直接比较页面二进制文件是不能准确判断出页面是否实质一致。需基于控制逻辑符号的输入输出连接关系, 构建可视化页面整体功能的模型结构, 进而实现可视化页面中符号节点及其连接关系与有向无环图数据结构之间的映射。采用有向无环图的拓扑排序算法, 形成表征逻辑模块连接关系的执行序列列表。进一步分析执行序列列表中影响应用程序逻辑的关键因素, 排除中间变量名、注释信息等对应用程序逻辑无关信息对可视化页面特征码提取的影响; 提取逻辑程序的拓扑关系、配合时序、数据和符号类型等关键特征信息, 将关键影响因素内容转换为中间信息文本, 基于中间信息文本计算可视化页面校验码。

### 1.4 可视化页面比较与交互

数据可视化是一个跨学科领域, 它将数据信

息和知识转化为视觉形式, 能够充分发掘人在视觉感知和模式识别方面的优势, 它为人们提供了一种快速进行信息传递和知识发现的方式和手段。

“比较”在可视化分析中不是一个单一的任务, 相反地, 它需要软件/用户在一组相关对象上进行一系列操作从而完成一组任务, 例如寻找相似、差异分析等<sup>[18]</sup>。可视化页面比较的概要原理是将有向无环图转换为顺次执行的符号节点树(1个符号对应1个节点), 对待比较的两个页面的节点树进行节点对齐、拓扑结构比较、属性比较。在拓扑比较中, 关注树的整体差异、局部差异, 例如节点的增加、删除。树的每个节点对应页面的实体对象, 属性的比较主要是分析实体对象的属性值变化, 具有不同特性的数据对应的比较内容侧重点也不尽相同, 需针对不同类型的符号进行具体分析。

“交互”允许用户与数据快速交流, 以更好地验证与发现内在联系, 帮助用户调整构思模型<sup>[13]</sup>。在可视化比较中, “交互”实现两个目标: 连接相关的对象、重新排列和显示对象。本文采用上下文焦点聚集技术、多视图关联协调技术, 在点击差异概要描述后, 高亮显示关联的节点符号, 在视图改变过程中将感兴趣的节点一直保留在视图中, 在一个全局图中进行细节的比较查看和焦点显示, 并为用户保留当前位置在全局中的上下文信息。

通过研究直流控制保护程序的组织方法和组织模式, 建立装置级、插件级、元件级以及所属页面各个层级之间的隶属关系。通过分析程序宏观结构和页面微观属性之间的关联特征信息, 建立程序组织结构数据表示模型。通过设计基于不同节点隶属关系的层次化信息提取机制, 实现控制保护程序的分层比较。

## 2 实现方案设计

### 2.1 可视化页面拓扑排序算法

读取可视化页面, 分析符号之间数据流关系, 并进行页面内符号拓扑排序是一致性校验和差异分析的前驱步骤。拓扑排序相关概念定义如下所述。

拓扑排序: 由某个集合上的一个偏序得到该集合上的一个全序, 这个操作称之为拓扑排序<sup>[20]</sup>。在代码生成中指根据符号的连接关系, 决定符号的执行顺序。

偏序: 若集合 $X$ 上的关系 $R$ 是自反的、反对称的和传递的, 则称 $R$ 是集合 $X$ 上的偏序关系<sup>[20]</sup>。

全序: 设 $R$ 是集合 $X$ 上的偏序, 如果对每个 $x、$

$y \in X$  必有  $xRy$  或者  $yRx$ , 则称  $R$  是集合  $X$  上的全序关系<sup>[20]</sup>。

直观地看, 偏序指集合中仅有部分成员之间可比较, 而全序指集合中全体成员可比较。

相比于常规的图遍历排序算法, 本文针对可视化页面程序的特点, 设计了一种基于位置坐标和数据流传递依赖相结合的拓扑排序算法, 如图 2 所示。

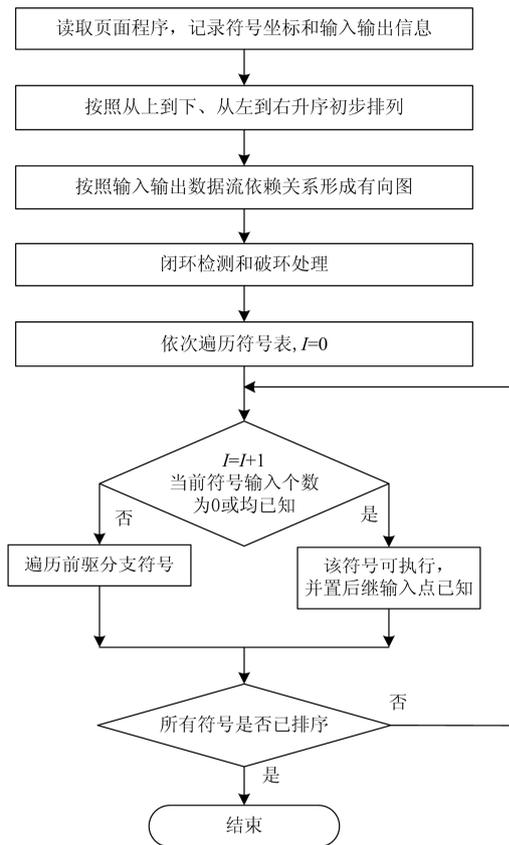


图 2 拓扑排序算法

Fig. 2 Topological sorting algorithm

排序算法步骤设计如下所述。

(1) 先将符号按照横向  $x$  坐标进行升序排列,  $x$  坐标相同的按纵向  $y$  坐标升序排列, 即按照从上到下、从左到右的 Z 字型扫描顺序, 形成初步顺序, 则当多个符号都满足执行条件时按照位置坐标的优先级排序。通过位置坐标的初步排序可以解决符号 undo-redo(先绘制、后删除、再绘制)时存储顺序变化导致排序结果不同的问题。

(2) 对程序页面图进行深度优先遍历, 遍历时按照数据流依赖关系进行拓扑排序, 设置符号满足可执行排序的条件如下: 该符号为零输入或者所有输入点都处于已知状态时, 该符号可以置为已知可执行状态。符号处于已知状态后, 可标记和该符号相

连接的后继符号输入点为已知状态。根据输入输出点相连接的有向图, 优先判断紧随该符号的后继符号状态是否已知, 把有数据流依赖关系的符号按分支遍历排序, 根据依赖关系形成符号的前驱后继分支, 然后按照深度优先的遍历原则, 形成符号的执行顺序。

(3) 当存在反馈输入时, 则深度优先遍历一次后, 没有符号满足已知可执行条件, 此时置闭环环路上的破坏符号为已知状态, 并驱动后继符号进入排序流程。

### 2.2 计算可视化页面校验码

将可视化程序页面视为 1 个黑盒子组件, 对外可见部分为页面输入和页面输出, 内部为符号块和连接线。如图 3 所示。



图 3 可视化页面组件模型

Fig. 3 Package model of visual graph page

页面输入变量通过符号的数据流传递, 最终连接到页面输出变量, 其近似关系是个多维矩阵的关联关系<sup>[21]</sup>。对可视化页面进行拓扑排序后, 形成页面内符号顺次执行的链表, 遍历链表内的符号, 根据符号的类型, 提取影响程序功能的关键信息, 结合页面本身的属性, 形成二进制中间文本  $S=S_1+S_2+\dots+S_N$ , 对中间文本计算 32 位 CRC, 作为页面的校验码。

符号特征数据包括: 符号类型、符号实例名称、符号执行顺序; 符号内各个变量的名字、类型、设置值; 符号对应的函数代码或对应的二进制封装库的 CRC 值; 符号的各个输入变量所连接的源输出变量信息(对应数据流关系)。页面属性数据包括: 页面的对应任务等级、任务周期、任务类型。中间信息文本记录页面从输入符号到输出符号整个分支路径的关键信息, 能有效检测出连接关系变化、调用顺序变化、功能函数变化、变量初始值变化、变量类型变化、符号属性变化等差异, 并排除位置微量移动但不影响执行排序的修改、中间变量名称变化等。

### 2.3 符号节点匹配标记算法

进行可视化页面内符号比较的前提是获取待比较的两个符号。由于页面修改前后可能新增、删除

符号, 不能仅根据拓扑排序形成的链表进行简单对齐, 需要将排序后链表形成树结构, 每个符号作为一个底层树节点, 进行节点匹配对齐。

符号有 UUID 属性, UUID 是符号新建时自动形成的一串随机字符串, 通过调用操作系统的 API 接口形成, 具有唯一性。符号节点匹配标记算法通过不同优先级的判据实现较优匹配。

如图 4 所示, 算法步骤如下所述。

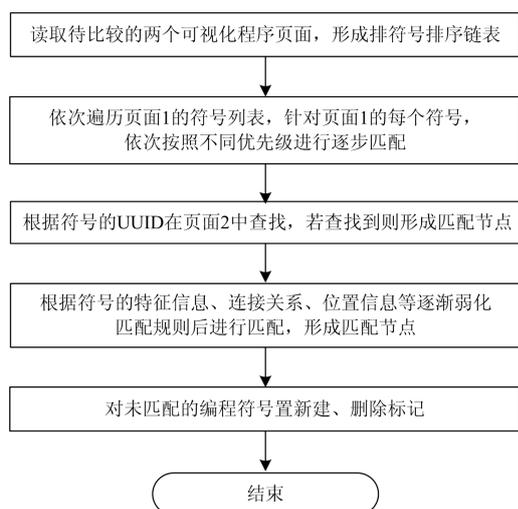


图 4 可视化页面组件模型

Fig. 4 Package model of visual graph page

(1) 依次遍历两个页面排序链表, 将页面 1 中的每一个符号与页面 2 中的每一个符号进行 UUID 的匹配, 若两个符号 UUID 相同, 则形成匹配节点, 并从符号链表里删除匹配的符号。当页面处于增量更新维护时, 大部分符号仅是属性和连接关系的修改, 少部分是新建/删除操作, 则 UUID 是优先匹配策略。

(2) 依次遍历两个页面排序链表, 将页面 1 中的每一个符号与页面 2 中的每一个符号进行特征信息的匹配。符号特征信息是在读取可视化程序页面时形成的字符串序列, 它描述了符号自身属性和外部连接关系, 具体包括符号的类型名称、符号变量的类型名称以及与输入输出连接点相连的对侧连接点信息。若两个符号特征信息相同, 则形成匹配节点, 并从符号链表里删除匹配的符号。

(3) 依次遍历两个页面排序链表, 将页面 1 中的每一个符号与页面 2 中的每一个符号进行相对位置匹配。如果两个符号类型、名称形同、相对位置偏差小于一个阈值, 则形成匹配节点, 并从符号链表里删除匹配的符号。

(4) 对于剩余未匹配符号, 设置页面 1 中未匹配

的符号为被删除标记, 设置页面 2 中未匹配符号为新建标记。

上述的符号节点匹配过程, 采用 3 个依次减弱的匹配条件对两个页面的符号进行筛选, 实现了未更改的符号能精确匹配, 属性和连接关系发生变化的符号能较优匹配。

## 2.4 多层次多维度差异提取分析

一台装置包括多块插件, 插件以插槽编号为关键字, 例如 B01。一块插件可包括多个处理器, 处理器以其编号为关键字, 例如 C1R1。处理器包括若干元件, 元件以结构名加实例名为关键字, 例如 MSQ:MSQInst1。元件包括若干页面, 页面以页面名为关键字, 例如 BIPCTRL。读取可视化程序后, 按照各层级节点的关键字进行匹配对齐, 形成待比较的两侧树形节点。针对不同层次节点, 从信号交互信息、页面执行顺序、页面内符号信息等维度进行差异分析。

(1) 分析和比较不同层级的信号交互信息, 包括: 提取各可视化页面内跨插件/跨元件/跨页面连接的输入块、输出块, 根据输入输出变量名进行查找匹配, 形成不同层级交互的输出-输入信号连接列表, 进行表格化对比。

(2) 分析和比较不同层级的执行顺序, 包括: 分析和比较各个处理器索引文件记录的元件存储顺序; 分析各个处理器内匹配元件的任务调度页面内的任务链符号, 比较各任务等级内页面调用顺序; 比较每个任务链的页面执行顺序; 采用树形结构的比较展示形式。

(3) 对页面内匹配的符号节点, 进行差异信息提取展示, 从符号自身属性、变量属性、连接关系、功能代码等维度进行差异分析。每一项差异内容关联记录符号 UUID, 在软件界面点击差异描述项时, 在两侧视图上高亮显示关联符号。

## 2.5 智能校核软件架构设计

软件整体架构如图 5 所示, 分可视化程序一致性校验模块、分层比较模块、界面展示模块。一致性校验模块进行页面排序、特征信息提取和特征码计算和校验, 得到不一致的页面列表。分层比较模块重点对可视化页面内符号进行匹配对齐, 分析和描述符号的差异内容。界面展示模块提供操作入口, 支持导入两个装置工程、目录、页面进行比较, 绘制差异目录树, 显示每个页面的差异项描述, 和高亮显示有差异符号, 支持左右两侧的编辑同步、刷新等操作。

图 6 是校核软件的界面示例, 点击某个具体差异项, 可定位到两侧页面内具体符号, 并加亮显示。

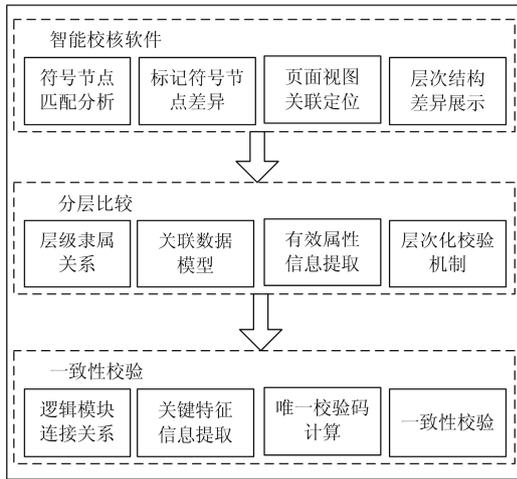


图5 智能校核软件架构

Fig. 5 Architecture of intelligent checking software

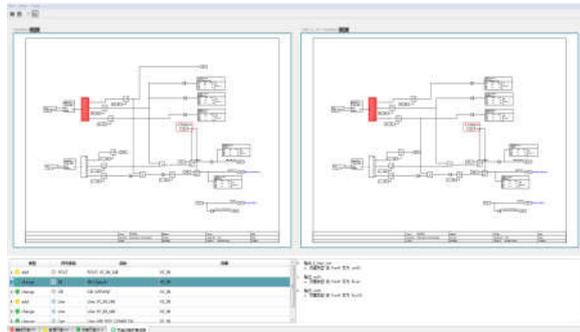


图6 软件界面示例

Fig. 6 Example of software GUI

### 3 结论

基于直流控制保护程序的组织方法和组织模式的梳理，以及控制逻辑模块对外连接输入输出调用关系的分析，提出可视化程序页面的校验码生成技术，实现每个可视化页面生成可信唯一校验码的目的，可快速准确地判断修改前后两个页面的本质功能是否一致。开发的特高压直流控制保护程序智能校核软件，支持对两个待比较的程序可视化页面进行分阶段、分层比较，并可快速直观地定位差异内容，展示详细的差异信息和关联定位符号。该软件通过对现场前后修改的程序整体比对，可防止超范围修改；可确保软件修改和工程维护升级的正确性，可提升特高压直流输电工程的运维能力和水平。

### 参考文献

[1] 陈国平, 王德林, 裘愉涛, 等. 继电保护面临的挑战与展望[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(16): 1-11, 26.  
CHEN Guoping, WANG Delin, QIU Yutao, et al. Challenges and development prospects of relay protection

technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(16): 1-11, 26.

[2] 李俊霞, 严兵, 张爱玲, 等. 特高压直流双极区直流保护系统可靠性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12): 130-136.  
LI Junxia, YAN Bing, ZHANG Ailing, et al. Reliability research for UHVDC bipolar area DC protection system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12): 130-136.

[3] 陈军, 庞晓燕, 赵子涵, 等. 应对特高压换流站紧急故障的负荷快切通信关键技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(7): 157-163.  
CHEN Jun, PANG Xiaoyan, ZHAO Zihan, et al. Research on key technology of load fast control communication for critical fault in ultra high voltage converter station[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(7): 157-163.

[4] 魏德华, 苗世洪, 刘子文, 等. 基于边界特征的高压直流输电长线路故障判别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(17): 75-82.  
WEI Dehua, MIAO Shihong, LIU Ziwen, et al. A fault identification method for HVDC transmission with long line based on boundary characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(17): 75-82.

[5] 王旭宁, 郭晓宁, 陈玉峰, 等. 一种通用的可视化嵌入式应用开发平台的设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13): 151-155.  
WANG Xuning, GUO Xiaoning, CHEN Yufeng, et al. Design and implementation of a universal visual embedded application development platform[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 151-155.

[6] 刘国伟, 陈宏君, 刘克金. 嵌入式装置可视化页面程序代码处理架构设计[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2017(5): 9-12, 18.  
LIU Guowei, CHEN Hongjun, LIU Kejin. Visual graph code processing architecture for embedded device[J]. Microcontrollers & Embedded Systems, 2017(5): 9-12, 18.

[7] 周特军, 邱建, 王春艺, 等. 基于 SVG 的可视化技术在继电保护定值在线校核系统中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 112-117.  
ZHOU Tejun, QIU Jian, WANG Chunyi, et al. Application of visualization technology based on SVG in on-line relay settings verification system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 112-117.

[8] 刘宏君, 李锋, 李会新, 等. 基于 SVG 图形的继电保护故障分析技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 140-144.  
LIU Hongjun, LI Feng, LI Huixin, et al. Study on fault

- analysis of relay protection based on SVG[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 140-144.
- [9] 赵林, 张令涛, 王赞, 等. 调度自动化系统多视图人机交互界面设计[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(6): 86-91. ZHAO Lin, ZHANG Lingtao, WANG Zan, et al. Design of human-machine interaction interface with multiple views for dispatching automation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(6): 86-91.
- [10] 曾鸣, 赵荣彩, 姚京松, 等. 基于特征提取的二进制代码比较技术[J]. 计算机工程与应用, 2006(22): 8-11. ZENG Ming, ZHAO Rongcai, YAO Jingsong, et al. Character-based comparison of executable objects[J]. Computer Engineering and Applications, 2006(22): 8-11.
- [11] 刘智萍, 黄箐. 代码/需求行为差异检测[J]. 计算机应用研究, 2016(7): 2056-2062. LIU Zhiping, HUANG Jing. Behaviour differences detection between code and requirement[J]. Application Research of Computers, 2016(7): 2056-2062.
- [12] 曹孟春, 陈凯明. 一种用于反编译代码与源代码的比较算法[J]. 计算机工程, 2009, 35(4): 38-40. CAO Mengchun, CHEN Kaiming. Differencing algorithm for decompilation code and source code[J]. Computer Engineering, 2009, 35(4): 38-40.
- [13] 李郑, 李姝, 王俊, 等. 基于抽象语法树分析的版本控制分支合并算法[J]. 计算机系统应用, 2015, 24(3): 139-146. LI Zheng, LI Shu, WANG Jun, et al. Revision control branch merging algorithm based on AST[J]. Computer Systems & Applications, 2015, 24(3): 139-146.
- [14] 黄寿孟, 高华玲, 潘玉霞. 软件相似性分析算法的研究综述[J]. 计算机科学, 2016, 43(6A): 467-470, 507. HUANG Shoumeng, GAO Hualing, PAN Yuxia. Summary of research on similarity analysis of software[J]. Computer Science, 2016, 43(6A): 467-470, 507.
- [15] 李彦龙, 李国强, 董笑菊. 树比较可视化方法综述[J]. 软件学报, 2016, 27(5): 1074-1090. LI Yanlong, LI Guoqiang, DONG Xiaojun. Survey on visualization of tree comparison[J]. Journal of Software, 2016, 27(5): 1074-1090.
- [16] 肖卫东, 孙扬, 赵翔, 等. 层次信息可视化技术研究综述[J]. 小型微型计算机系统, 2011, 32(1): 137-146. XIAO Weidong, SUN Yang, ZHAO Xiang, et al. Survey on the research of hierarchy information visualization[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2011, 32(1): 137-146.
- [17] 于海, 曾丽丽, 杨亚璞, 等. 基于图论的特高压直流工程最后断路器自适应判断策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(5): 121-126. YU Hai, ZENG Lili, YANG Yapu, et al. Self-adaptive strategy for the last breaker in UHVDC project based on graph theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(5): 121-126.
- [18] 谢敏, 杨帆, 曾璇. 无向图的层次化谱分析同构判定算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2015, 27(11): 2169-2176. XIE Min, YANG Fan, ZENG Xuan. Hierarchical spectral analysis isomorphism testing algorithm for undirected graph[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2015, 27(11): 2169-2176.
- [19] 范心明, 陈锦荣, 吴树鸿, 等. 离散学习优化算法在含分布式电源的配网重构中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 156-163. FAN Xinming, CHEN Jinrong, WU Shuhong, et al. Application of discrete learning optimization algorithm to distribution network reconfiguration considering distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 156-163.
- [20] SEDGEWICK R. C 算法 (第二卷, 图算法)[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2004.
- [21] 贺敏, 陈宏君. 图形化程序特征码的算法设计与应用[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2017, 17(2): 7-10. HE Min, CHEN Hongjun. Design and application of visual graphical program feature code[J]. Microcontrollers & Embedded Systems, 2017, 17(2): 7-10.

收稿日期: 2018-05-30; 修回日期: 2018-09-11

作者简介:

陈宏君(1981—), 男, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 主要从事保护控制平台研发工作; E-mail: chenhj@nrec.com

文继锋(1978—), 男, 硕士, 研究员级高级工程师, 主要从事继电保护和平台研发管理工作; E-mail: wenjif@nrec.com

谭林丰(1991—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事保护控制平台研发工作。E-mail: tanlinfeng@nrec.com

(编辑 姜新丽)