

# 基于 CHS 软件的潜在通路分析方法

黄 聪, 张 宇, 霍 宏

(北京航天自动控制研究所, 北京 100854)

**摘要:** 针对传统潜在通路分析充斥着大量的手工操作, 效率低下, 而且还存在着分析周期长、自动化水平低和错误率高等问题, 提出了基于 Mentor Graphics 公司 CHS (Capital Harness System) 软件的潜在通路分析方法, 只需按照仿真步骤依次建立电气元件模型、构造功能约束, 即可自动进行潜在通路遍历与分析; 与传统潜在通路分析方法相比, 该方法不仅减少了重复性操作, 同时在降低系统复杂性、提高系统分析结果正确性和增强数据管理规范性、一致性等方面具有明显优点; 以某运载火箭配电图为例, 利用 CHS 软件开展潜在通路分析, 仿真结果验证了该方法的正确性和可行性。

**关键词:** CHS; 电气元件模型; 功能约束; 潜在通路分析

## Sneak Circuit Analysis Method Based on CHS Software

Huang Cong, Zhang Yu, Huo Hong

(Beijing Aerospace Automatic Control Institute, Beijing 100854, China)

**Abstract:** The traditional sneak circuit analysis were full of manual operations, low efficiency, and there were problems such as long analysis cycle, low automation level and high error rate. The sneak circuit analysis method based on Mentor Graphics' CHS (capital harness system) software was proposed, which could perform sneak circuit traversal and analysis automatically simply by following the simulation steps to build electrical component models and construct functional constraints. Compared to traditional sneak circuit analysis, this method could not only reduce the repetitive operations, but had obvious advantages in reducing system complexity, improving the accuracy of system analysis results, and enhancing the standardization and consistency of data management. The validity and feasibility of the method has been confirmed experimentally in the power distribution diagram of a launch vehicle by using CHS software.

**Keywords:** CHS; electrical component model; functional constraints; sneak circuit analysis

## 0 引言

潜在通路 (sneak circuit analysis, SCA) 是指在电气电子系统中无意中引入的一种在特定情况下使得系统产生非期望功能或抑制期望功能的电路, 它与硬件失效无关, 而是设计者无意地设计并进入系统的一种潜在状态<sup>[1]</sup>。由于潜在通路具有普遍性、突发性等特点, 使得潜在通路激发条件和状态经常不能被设计人员提前认知, 导致对潜在通路缺乏防范性的措施, 因此潜通路对复杂电路系统的危害是巨大的、灾难性的, 通过对潜在通路产生的原因进行分析, 主要原因归纳为以下 4 种:

1) 设计更改导致: 对原始电路设计更改造成系统中产生潜在通路;

2) 设计者疏忽: 大型复杂电路中, 由于设计者的疏忽, 设计之初没有意识潜在通路发生条件, 将潜在通路风险引入到系统中;

3) 不兼容设计导致: 庞大的电路系统通常由不同部分组成, 每个部分的部组件不尽相同, 组装成的系统中部组件不兼容可能会诱发潜在通路的风险;

4) 人为原因: 许多潜在通路发生的原因, 是由于人未按照规程操作, 误动作导致的误触发而造成的。

在航天发射领域, 由于大量采用以开关、继电器电路为特征的供电程序、时序系统, 软硬件状态切换频繁, 人工操作与自动操作并存, 多部门协作、多学科复杂的复杂状态, 很容易出现潜在通路。所以事先分析出潜通路并采取相应措施, 对提高系统的安全性与可靠性是非常必要的<sup>[2]</sup>。

CHS 是国际著名设计软件厂商 Mentor Graphics 公司推出的一款专业线缆设计软件工具, 主要应用于航空航天、汽车电气系统线束设计<sup>[3-5]</sup>, 其特色在于强大的数据管理和流程管理能力, 企业级应用整合能力, 简单易学的用户交互界面, 大量的自动化设计功能, 和高度的用户可配置性及可扩展性。CHS 软件包含的仿真模块 Capital Analysis 具备建立元组件 Symbol 库功能, 支持绘制电路原理接线图, 但 CHS 软件本身不自带仿真分析功能<sup>[6]</sup>。

本文提出基于线束设计系统 CHS 的潜在通路分析方法, 依托 CHS 仿真平台 Capital SimProve 模块, 结合具体任务需求开展潜在通路分析, 能够大幅缩短分析时间, 提高潜在通路分析效率, 通过计算机仿真分析技术的应用, 实现对部分电路自动化进行潜在通路分析, 全面识别系统中存在的潜在通路, 极大提升仿真分析结果的可靠性, 为复杂电路潜在通路自动分析提供了一种新的思路和方法。

收稿日期: 2019-10-22; 修回日期: 2019-11-17。

作者简介: 黄 聪(1992-), 男, 湖北黄冈人, 硕士, 工程师, 主要从事运载火箭控制系统设计方向的研究。

## 1 典型电气元件建模

电气元件模型库在 Mentor CHS 软件中建立。CHS 模型库中自带的电气元件非常有限<sup>[7]</sup>，元件模型中包含的参数也比较少，在进行潜在通路分析前需对常规电子元器件和电气组件进行建模。

对于 CHS 电气元件的模型而言，最重要的两个部分是 Structure（模型结构）和 Behavior（模型行为），模型结构是由节点和负载组成，负载表征模型特性，节点与 Symbol 的 Pin 进行 Attach 链接，而模型行为即通过 CHS 能够识别的 Saint 语言对模型结构进行说明，即可表征出模型所实现的相应功能<sup>[8]</sup>，电气元件建模流程如图 1 所示。

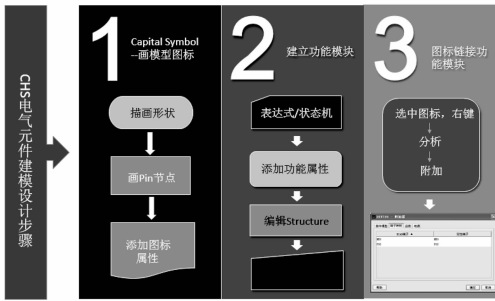


图 1 电气元件建模流程

以直流电压源模型为例，具体建模流程如下：

1) 构建 Symbol 图标：启动 CHS 仿真软件，点击进入 Capital Symbol，完成图标的形状、节点和属性设置，图 2 为直流电压源 Symbol 图。

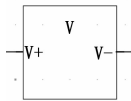


图 2 直流电压源 Symbol 图

2) 建立模型结构：直流电压源的模型结构设置两个外部节点分别为 VP、VM，中间是理想电压源，和电源内阻 POS\_SUPPLY 和 NEG\_SUPPLY，其中 NEG\_SUPPLY 为 0。将模型结构中外部节点 VP、VM 与图 2 中 V+、V- 外部节点 Attach 链接，实现实现 Symbol 模块和 Structure 模块的统一。

3) 描述模型行为：根据元件的行为模型，CHS 建立功能模型有表达式和状态机两种方式。

表达式建模的优点是简单、直观，利用 Saint 语言表达式即可表征模型的相应电气属性，如开关电阻等简单元器件即是采用这种建模方式进行建模的。

状态机建模方式唯一与表达式有区别的是模型的 Behavior 部分，每个状态代表实现电气元件相应的静态功能，状态之间由触发条件进行切换，动态元件就是通过静态状态之间切换等效其动态特性，每个静态状态功能也是通过 Saint 语言实现的。状态机建模的优点是能对复杂电气元件进行建模，利用 Saint 语言表达式编写电气元件相应的静

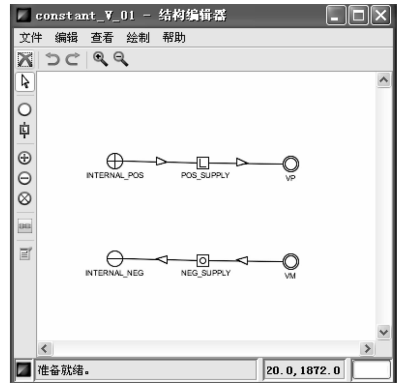


图 3 模型结构图

态状态，通过触发条件进行状态之间的切换，可以实现对动态元件的建模。

直流电压源模型采用状态机建模的方式，模型行为如图 4 所示。

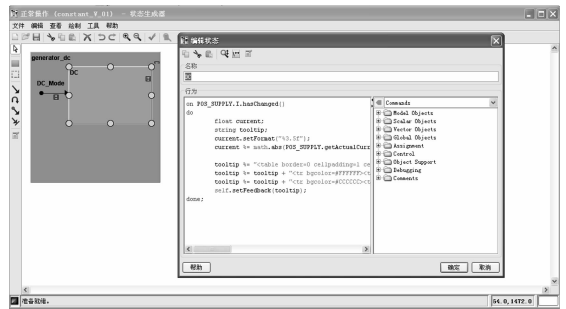


图 4 模型行为

4) 建立模型参数：在直流电压源 Model 特性中设置模型参数，设置的参数通过参数名称传递到图 4 中 State Machine 建模中，直流电压源模型参数如图 5 所示。

名称	数值	类型	可见的	属性
DC Res	1.0	浮点数值	<input type="checkbox"/>	等
Range	0.001	浮点数值	<input type="checkbox"/>	等
T	25.0	浮点数值	<input type="checkbox"/>	等
Tcr	0.003	浮点数值	<input type="checkbox"/>	等
V Out	12.0	浮点数值	<input type="checkbox"/>	等

图 5 模型参数

DC Res 代表直流电压源的直流电阻值 ( $\Omega$ )；Range 代表直流电压源的稳压精度，可设置正负，实际输出电压为  $V_{Out} = V_{Out} * (1 + Range)$ 。V<sub>Out</sub> 为直流电压源输出电压 (V)；T 代表环境温度；Tcr 代表温度系数，其中 T<sub>0</sub> 为默认初始温度 25℃。根据温度变化对电阻的影响，利用公式  $Tcr = \frac{R_1 - R_0}{R_0(T_1 - T_0)}$  求解温度变化后的电阻值 R<sub>1</sub>。

## 2 Capital SimProve 仿真器

CHS 软件中的 SCA 仿真器 Capital SimProve 允许用户

进行潜在通路仿真验证, 具体流程如图 6 所示。

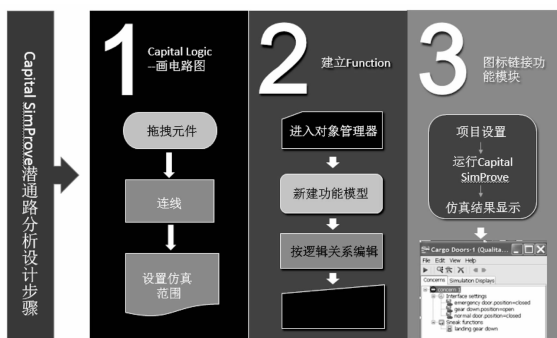


图 6 潜在通路仿真验证流程图

### 2.1 建立原理接线图

原理接线图是指系统的所有组成部分、工作原理和互联系关系的图样, 选择 CHS 软件的原理/接线设计模块 (Capital Logic), 进行电路原理接线图设计, 选择新建逻辑设计的菜单。依次输入设计的名字, 修订编号, 按照逻辑和接线关系绘制出等效的系统原理接线图。

以飞机起落架为例, 按照电路逻辑图的关系, 在 CHS 中画出电路如图 7 所示, 接线图描述了原理图中的信号线转化成独立导线的过程, 表征了电路的功能与原理。

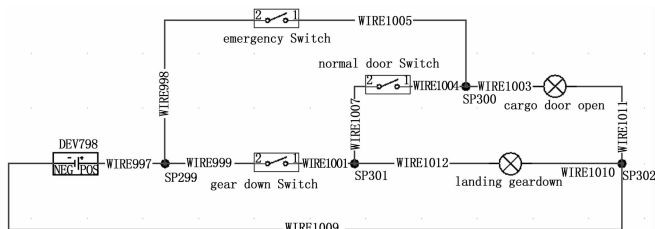


图 7 飞机起落架逻辑图

从 CHS 仿真软件符号 (Symbol) 库中选择相应的符号添加到逻辑图中, 依次设置各电气元件的参数属性值, 按照电路逻辑关系采用 Wire 连接方式对各电气元件连线, 并按图 8 所示的步骤设置 CHS 仿真范围, 至此完成了 SCA 仿真的所有仿真配置步骤。



图 8 设置原理接线图仿真范围

### 2.2 建立 Function 功能约束

Function 又称为 SCA 仿真分析的功能约束文件, 它是整个 SimProve 仿真引擎的核心部分, 表征了电路原理图中开关组合和电气元件的功能约束关系。基于 CHS 软件的潜在通路分析采用的是遍历的原则, 筛选出不符合设计预期的潜在导通通路并在电路图中高亮显示, 筛选的原则就是此处建立的 Function 文件。

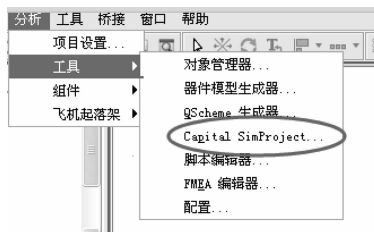


图 9 建立 Capital SimProject

依次选择分析→工具→Capital SimProject, 如图 9 所示。按照飞机起落架电路图的电路逻辑关系, 只有当紧急开关 (emergency switch) 闭合, 或者起落架开关 (gear down switch) 和舱门开关 (normal door switch) 同时闭合, 飞机舱门才会触发打开。建立其 Function 函数如图 10 所示。

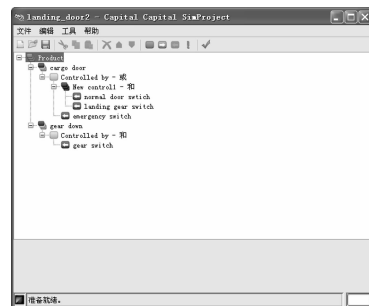


图 10 飞机起落架电路图 Function 功能约束

为了实现设计的 Function 中的函数与电路逻辑图中电气元件进行链接, 需要对电路图的原理接线图进行项目设置, 配置步骤如下:



图 11 电路原理接线图项目设置

配置完项目设置后, 需要继续对原理接线图中电气元件 Attach 其 Function 属性, 以 emergency Switch 开关的属性为例, 它表征的 Function 属性为 emergency Switch 开关闭合时舱门被触发打开, 因此属性 (Property) 设置勾选闭合 (closed) 状态, 如图 12 所示。

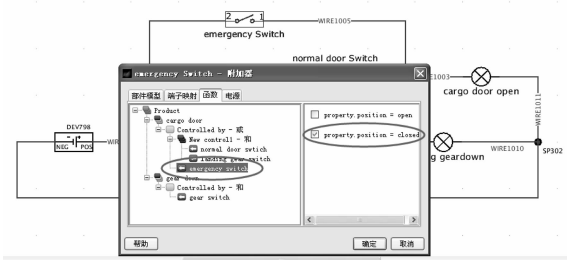


图 12 链接 Function 功能约束属性

### 2.3 Capital SimProve 仿真

依次选择分析→仿真→Capital SimProve 进入 SCA 仿真界面，点选 Simulation 即可进行 SCA 仿真分析。仿真运行完成后，显示潜在通路列表。电路图中的潜在通路在图中高亮显示，界面上显示此时的开关状态和误触发导通状态，供设计人员检查与确认。

### 3 仿真验证与分析

以某型号运载火箭箭上地面配电图为例，基于 CHS 仿真软件进行潜在通路仿真验证与分析。箭上、地面所采用的继电器均为 165 厂生产的 6JRXM-2，接通电压  $\geq 16$  V，线包电阻为  $250\Omega$ ，1C32 中消反峰电阻为  $27\Omega$ ，箭上 +E 供电单机正负端之间电阻可以忽略不计。+B1→-B1 电压：28 V；+E→-B1 电压：28 V。具体表示如图 13 所示。

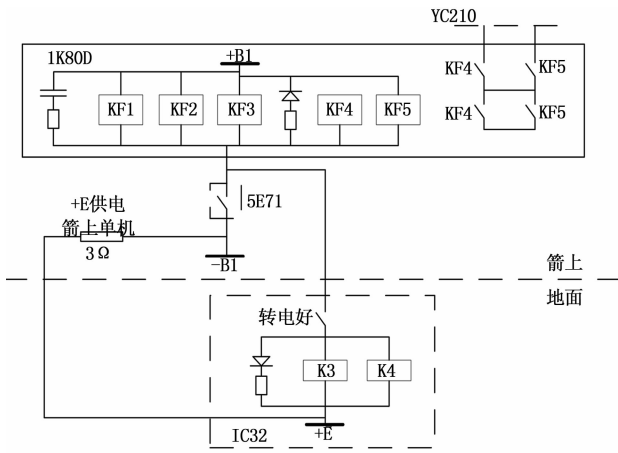


图 13 某型号运载火箭箭上地面配电图

图 13 表示的电路功能关系为：只有当开关 5E71 闭合时，继电器 KF5 所对应的线圈才会被触发带电，其它任何形式的误触发使得继电器 KF5 线圈带电导通均视为潜在通路。

按照电路图的逻辑连接关系，在 CHS 软件的 Capital Logic 仿真工具中绘制其等效的电路原理图，如图 14 所示。

+B1 与 +E 分别为箭上供电电源和地面供电电源，+B1\_SW 与 +E\_SW 分别为电源选择开关，默认为闭合状态，当电源选择开关打开时，表示该条支路的电源线转为供电公用线。D1~D4 为理想二极管，当电流反向流通时，二极管支路反向截止。KF1~KF5、K3~K4 为继电器线圈等效电阻，5E71 为火箭发射分离等效开关。按照电路图逻

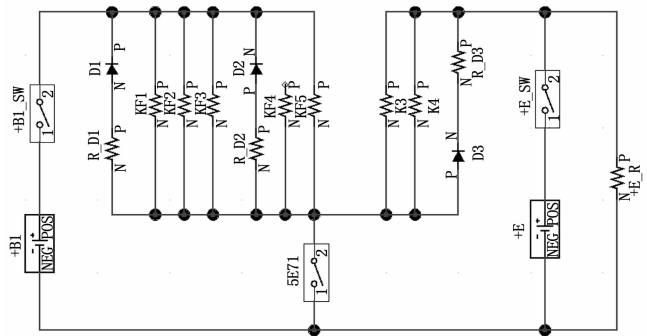


图 14 某型号运载火箭箭上地面配电原理接线图

辑关系，建立 Function 功能约束如图 15 所示。

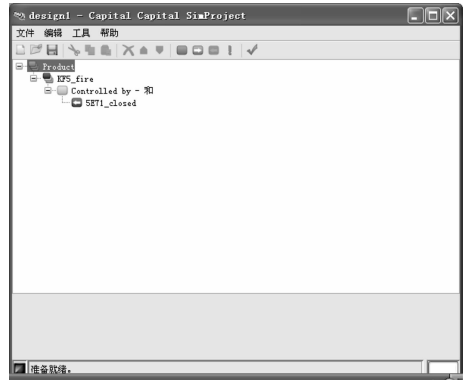


图 15 箭上地面配电图 Function 功能约束

按照 CHS 潜在通路仿真工具 Capital SimProve 仿真步骤，对电气元件功能模块分别 Attach 其对应的 Function 功能约束，具体步骤如图 16 所示。

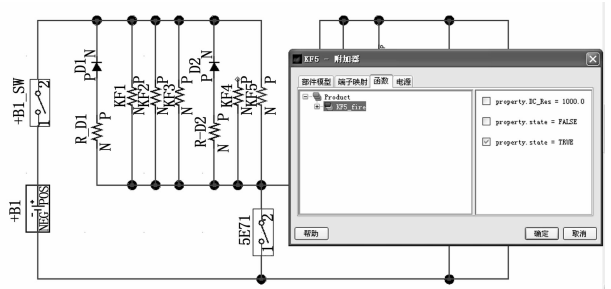


图 16 箭上地面配电图链接功能约束

设置完成仿真范围之后，即可进行 Capital SimProve 仿真功能，仿真显示按照设置的功能约束，电路中存在一条潜在导通通路，其开关组合如图 17 所示。

在 Capital Logic 仿真模块中高亮显示如图 18 所示。

从仿真结果可以看出，当 +B1\_SW 开关闭合，+E\_SW 开关打开，即使 5E71 开关处于打开状态，继电器 KF5 线圈仍会触发带电导通，证明系统中存在一条潜在通路，验证了 Capital SimProve 仿真功能的正确性。

### 4 结束语

针对传统潜在通路分析状态复杂、耗时久等特点，本文提出了基于 CHS 仿真平台包含的 SimProve 模块开展潜在



图 17 箭上地面配电图潜在通路开关组合

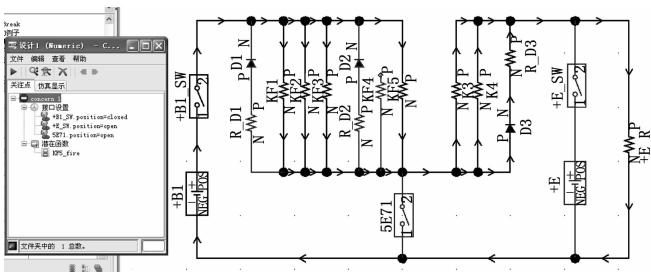


图 18 箭上地面配电图潜在通路高亮显示

通路分析的方法, 只需按照仿真步骤依次建立电气元件模型、构造功能约束, 即可自动进行潜在通路遍历分析, 提高分析效率, 保证了分析结果的可靠性, 从根源上避免潜在通路的形成, 在实际工程应用中具有借鉴和实用价值。

参考文献:

[1] 胡昌华, 陈斌文, 刘丙杰. 复杂系统潜在问题分析理论与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.

[2] 卢佩英, 沈士团, 孙宝江. 潜在通路分析在自动测试系统中的应用研究 [J]. 计算机测量与控制, 2006, 14 (7): 847-866.

[3] 黄如昌, 周艳娇. CHS 在飞机一体化测试改装中德应用 [J]. 中国科技信息, 2017, 3 (5): 24-25.

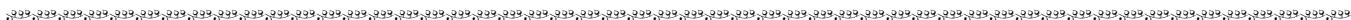
[4] 刘美静. 基于 CHS 的机载线束管理平台设计与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2015.

[5] 张 弛. 一种基于 CHS 软件的飞机线束设计方法 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 25 (5): 36-39.

[6] 黄 聪, 梅 洪, 张庆振. 基于连接矩阵的潜在通路定性分析方法 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (9): 240-243.

[7] 郝冬晶. 基于 CHS 软件的飞机线束设计应用 [J]. 科技咨询, 2013, 16 (6): 19-20.

[8] Mentor Graphics. Capital harness system workbook [Z]. Mentor Graphics, 2019.



(上接第 152 页)

是仍旧可以保证电力通信业务的正常运行。利用 QoS 配置方法, 将其应用在不同厂商的设备中, 智能化的生成相应的 QoS 配置命令, 从而形成基于电力通信业务的 QoS 命令模板的自动生成, 使得不同的设备厂家可以根据网络状况灵活的生成 QoS 配置方案, 从而有效提高网络资源利用效率的同时, 可以保证在电力通信业务在拥塞情况下的正常运行, 保障电力系统的安全。

参考文献:

[1] 张 逸, 林 焱, 吴丹岳, 等. 电能质量监测系统研究现状及发展趋势 [J]. 电力系统保护与控制, 2015 (2): 138-147.

[2] 杨 阳, 汪玉成, 吕玉祥, 等. 基于软件定义的电力通信网络业务感知流量调度机制研究 [J]. 自动化与仪器仪表, 2017 (8): 146-149.

[3] 曲广龙, 杨洪耕, 李兰芳, 等. 主动配电网电能质量实时监测系统设计与实现 [J]. 电力系统自动化, 2015 (10): 117-123.

[4] 缪 茸. 基于 MIB 的电力远程监测系统信息模型的研究 [J]. 自动化与仪器仪表, 2017 (7): 71-72.

[5] 李雅丽, 李永江. 基于 TCP 通信方案的电力线路状态监测系统研究 [J]. 电源技术, 2015, 39 (1): 175-177.

[6] 钟 庆, 刘 峰, 王 钢, 等. 电能质量监测数据中间距离聚类分析 [J/O]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28 (8): 73-77.

[7] 陈星豪, 黄柳萍, 陶国飞. 基于随机矩阵理论的电力大数据表征方法 [J]. 电网技术, 2017, 36 (3): 35-38.

[8] 陈子辉, 王硕君, 刘勇浩, 等. 基于数据质量的电能质量监测装置远程可靠性评估 [J]. 广东电力, 2017, 30 (1): 73-78.

[9] 周 鑫, 田 兵, 许爱东, 等. 基于 CYMDIST 的配电网运行优化技术及算例分析 [J]. 电网与清洁能源, 2015, 31 (2): 91-97.

[10] 易映萍, 罗 海, 胡四全. 小功率光伏并网逆变器控制策略的研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2016 (4): 64-68.

[11] 林 密, 洪 杰, 于祝芳. 基于 Tabu 算法的配电网无功补偿 [J]. 电气自动化, 2015 (1): 91-93.

[12] 肖 雄, 刘 治. 基于负荷管理终端的电能质量监测研究与分析 [J]. 广东电力, 2016, 29 (2): 85-89.

[13] 林 密, 洪 杰, 于祝芳, 等. 面向电力通信网现场可穿戴运维作业工单调度优化方法 [J]. 电子测量技术, 2019 (6): 123-128.

[14] 苏永义, 隋树法, 周忠堂, 等. 配电网电能质量智能监控方法的研究 [J]. 自动化与仪器仪表, 2017 (10): 58-60.

[15] 吴富杰, 苏小林, 阎晓霞, 等. 基于多目标的主动配电网有功无功协调优化 [J]. 自动化技术与应用, 2015, 34 (11): 59-65.

[16] 金 鑫, 李龙威, 苏国华, 等. 基于 Spark 框架和 PSO 优化算法的电力通信网络安全态势预测 [J]. 计算机科学, 2017, 44 (z1): 366-371.

[17] 刘兆炜, 王汉军, 李 丹, 等. 改进 SOM 神经网络在电力调度故障诊断中的应用 [J]. 计算机系统应用, 2018 (3): 181-187.

[18] 姚继明, 黄 凤, 田文锋, 等. 电力 LTE 异频组网系统应用研究 [J]. 计算机技术与发展, 2017, 27 (3): 181-184.

[19] 黄 波. 基于 NCLMS 的 QPSK-PCMA 系统仿真分析 [J]. 计算机技术与发展, 2017, 27 (3): 155-158.

[20] 谢小军, 潘子春, 夏同飞. 基于 SDN 架构的电力通信网络质量感知技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (10): 181-185.