

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2024 年 5 月 23 日 (23.05.2024)



(10) 国际公布号
WO 2024/103232 A1

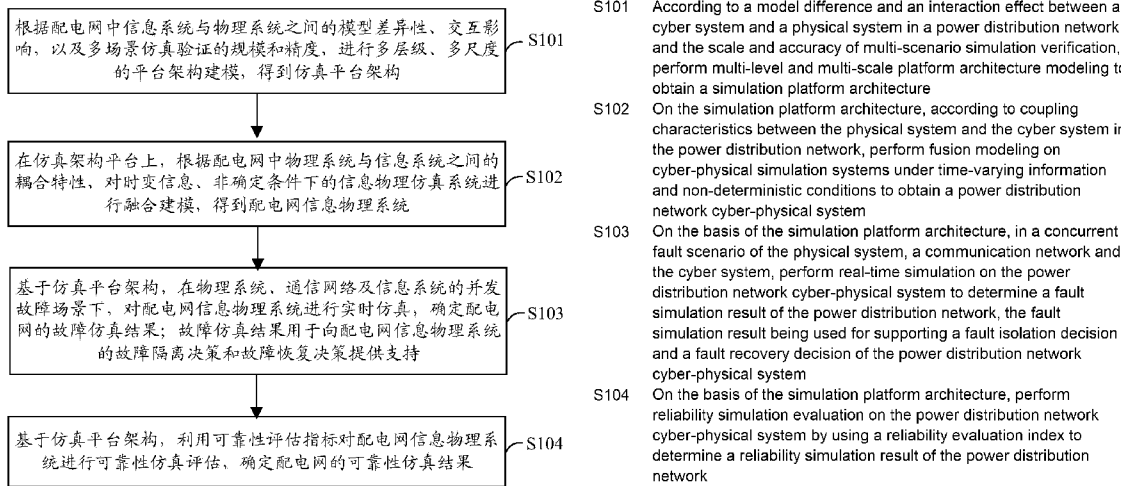
- (51) 国际专利分类号:
H02J 13/00 (2006.01) **H02J 3/00** (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2022/131777
- (22) 国际申请日: 2022 年 11 月 14 日 (14.11.2022)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (71) 申请人: 中国电力科学研究院有限公司 (CHINA ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE) [CN/CN]; 中国北京市海淀区清河小营东路15号, Beijing 100192 (CN)。 国家电网有限公司 (STATE GRID CORPORATION OF CHINA) [CN/CN]; 中国北京市西城区西长安街86号, Beijing 100031 (CN)。
- (72) 发明人: 盛万兴 (SHENG, Wanxing); 中国北京市海淀区清河小营东路15号, Beijing 100192 (CN)。 刘

科研 (LIU, Keyan); 中国北京市海淀区清河小营东路15号, Beijing 100192 (CN)。 李昭 (LI, Zhao); 中国北京市海淀区清河小营东路15号, Beijing 100192 (CN)。 王帅 (WANG, Shuai); 中国北京市海淀区清河小营东路15号, Beijing 100192 (CN)。 叶学顺 (YE, Xueshun); 中国北京市海淀区清河小营东路15号, Beijing 100192 (CN)。 白牧可 (BAI, Muke); 中国北京市海淀区清河小营东路15号, Beijing 100192 (CN)。 康田园 (KANG, Tianyuan); 中国北京市海淀区清河小营东路15号, Beijing 100192 (CN)。 贾东梨 (JIA, Dongli); 中国北京市海淀区清河小营东路15号, Beijing 100192 (CN)。

(74) 代理人: 北京派特恩知识产权代理有限公司 (CHINA PAT INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE); 中国北京市海淀区海淀南路21号中关村知识产权大厦B座2层, Beijing 100080 (CN)。

(54) Title: POWER DISTRIBUTION NETWORK SIMULATION METHOD, SYSTEM AND DEVICE, AND COMPUTER-READABLE STORAGE MEDIUM

(54) 发明名称: 配电网仿真方法、系统、设备和计算机可读存储介质



(57) Abstract: Disclosed in embodiments of the present invention are a power distribution network simulation method, system and device, and a computer-readable storage medium. The method comprises: according to a model difference and an interaction effect between a cyber system and a physical system in a power distribution network and the scale and accuracy of multi-scenario simulation verification, performing multi-level and multi-scale platform architecture modeling to obtain a simulation platform architecture; on the simulation platform architecture, according to coupling characteristics between the physical system and the cyber system in the power distribution network, performing fusion modeling on cyber-physical simulation systems under time-varying information and non-deterministic conditions to obtain a power distribution network cyber-physical system; on the basis of the simulation platform architecture, in a concurrent fault scenario of the physical system, a communication network and the cyber system, performing real-time simulation on the power distribution network cyber-physical system to determine a fault simulation result of the power distribution

(81) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SC, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, ME, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

network; and on the basis of the simulation platform architecture, performing reliability simulation evaluation on the power distribution network cyber-physical system by using a reliability evaluation index to determine a reliability simulation result of the power distribution network.

(57) 摘要: 本发明实施例公开一种配电网仿真方法、系统、设备和计算机可读存储介质。该方法包括: 根据配电网中信息系统与物理系统之间的模型差异性、交互影响, 及多场景仿真验证的规模和精度, 进行多层级、多尺度的平台架构建模, 得到仿真平台架构; 在仿真平台架构上, 根据配电网中物理系统与信息系统之间的耦合特性, 对时变信息、非确定条件下的信息物理仿真系统进行融合建模, 得到配电网信息物理系统; 基于仿真平台架构, 在物理系统、通信网络及信息系统的并发故障场景下, 对配电网信息物理系统进行实时仿真, 确定配电网的故障仿真结果; 基于仿真平台架构, 利用可靠性评估指标对配电网信息物理系统进行可靠性仿真评估, 确定配电网的可靠性仿真结果。

配电网仿真方法、系统、设备和计算机可读存储介质

技术领域

本发明涉及电力系统仿真技术领域，尤其涉及一种配电网仿真方法、系统、设备和计算机可读存储介质。

5 背景技术

随着先进信息技术的快速发展及其在电力系统中的深度应用，电力基础网络和电力信息网络的联系日益紧密，新型电力系统已具备信息物理系统（Cyber Physical Systems, CPS）的特点，同时涉及电力系统、计算科学、网络通信、控制理论等多个学科。日益复杂的网络系统给传统电力系统的感知、分析、决策与控制等环节带来了严峻挑战。传统电力系统研究与信息系统研究在理论和方法上10是割裂的，物理电力系统是连续变化的，其电气量已潮流形式流经电力节点和支路；信息通信系统则是离散系统，其信息变化由离散时间触发和驱动。

相关技术中的配电网信息物理系统融合建模方法，将通信信息的作用效果作为输入量考虑到物理过程中进行建模与控制，侧重将信息元素加入到传统的物理模型中，未全面考虑信息通信对物理系统的交互影响，降低了配电网信息物理系统的适应性。

15 发明内容

本发明实施例提供一种配电网仿真方法、系统、设备和计算机可读存储介质，提高了配电网信息物理系统的适应性。

本发明实施例的技术方案是这样实现的：

第一方面，本发明实施例提供一种配电网仿真方法，所述方法包括：根据配电网中信息系统与物理系统之间的模型差异性、交互影响，以及多场景仿真验证的规模和精度，进行多层次、多尺度的平台架构建模，得到仿真平台架构；在所述仿真平台架构上，根据所述配电网中所述物理系统与20所述信息系统之间的耦合特性，对时变信息、非确定条件下的信息物理仿真系统进行融合建模，得到所述配电网信息物理系统；基于所述仿真平台架构，在所述物理系统、通信网络及所述信息系统的并发故障场景下，对所述配电网信息物理系统进行实时仿真，确定所述配电网的故障仿真结果；25所述故障仿真结果用于向所述配电网信息物理系统的故障隔离决策和故障恢复决策提供支持；基于所述仿真平台架构，利用可靠性评估指标对所述配电网信息物理系统进行可靠性仿真评估，确定所述配电网的可靠性仿真结果。

第二方面，本发明实施例提供一种配电网仿真系统，所述系统包括：平台搭建部分，被配置为根据配电网中信息系统与物理系统之间的模型差异性、交互影响，以及多场景仿真验证的规模和精度，进行多层次、多尺度的平台架构建模，得到仿真平台架构；融合部分，被配置为在所述仿真平台架构上，根据所述配电网中所述物理系统与所述信息系统之间的耦合特性，对时变信息、非确定条件下的信息物理仿真系统进行融合建模，得到所述配电网信息物理系统；故障仿真部分，被配置30为基于所述仿真平台架构，在所述物理系统、通信网络及所述信息系统的并发故障场景下，对所述配电网信息物理系统进行实时仿真，确定所述配电网的故障仿真结果；所述故障仿真结果用于向所述配电网信息物理系统的故障隔离决策和故障恢复决策提供支持；可靠性仿真部分，被配置为基于所述仿真平台架构，利用可靠性评估指标对所述配电网信息物理系统进行可靠性仿真评估，确定所35述配电网的可靠性仿真结果。

第三方面，本发明实施例提供一种配电网仿真设备，所述设备包括：存储器，被配置为存储可执行计算机程序；处理器，被配置为执行所述存储器中存储的可执行计算机程序时，实现上述配电网仿真方法。40

第四方面，本发明实施例提供一种计算机可读存储介质，存储有计算机程序，被配置为被处理

器执行时, 实现上述配电网仿真方法。

本发明实施例提供了一种配电网仿真方法、系统、设备和计算机可读存储介质。根据本发明实施例提供的方案, 根据配电网中信息系统与物理系统之间的模型差异性、交互影响, 以及多场景仿真验证的规模和精度, 进行多层次、多尺度的平台架构建模, 得到仿真平台架构, 增加了仿真平台的灵活加载功能、实时同步通信功能和功能构建功能, 可以实现事件驱动与连续时间响应的配电网信息物理系统协同仿真。在仿真平台架构上, 根据配电网中物理系统与信息系统之间的耦合特性, 对时变信息、非确定条件下的信息物理仿真系统进行融合建模, 得到配电网信息物理系统, 通过多场景、多分辨率、多响应时间尺度下模型构建, 提高了配电网信息物理系统的多样性。基于仿真平台架构, 在物理系统、通信网络及信息系统的并发故障场景下, 对配电网信息物理系统进行实时仿真, 确定配电网的故障仿真结果; 故障仿真结果用于向配电网信息物理系统的故障隔离决策和故障恢复决策提供支持, 满足了配电网信息物理系统的多场景仿真分析的需求。基于仿真平台架构, 利用可靠性评估指标对配电网信息物理系统进行可靠性仿真评估, 确定配电网的可靠性仿真结果, 为配电网可靠性提高提供了理论支撑与决策辅助, 维护了配电网的稳定可靠运行, 提高了配电网信息物理系统的适应性。

附图说明

图1为本发明实施例提供的一种配电网仿真方法的可选的步骤流程图;
图2为本发明实施例提供的一种基于动态相量法的配电混合网等值建模的可选的流程图;
图3为本发明实施例提供的一种防火墙模型 Petri 网模型的可选的示意图;
图4为本发明实施例提供的一种密码模型的可选的示意图;
图5为本发明实施例提供的一种伪造身份认证攻击过程模型的可选的示意图;
图6为本发明实施例提供的一种端口管理 Petri 网模型的可选的示意图;
图7为本发明实施例提供的一种虚假数据注入攻击信息网络 Petri 网模型的可选的示意图;
图8为本发明实施例提供的一种含虚假拉合闸命令的攻击过程 Petri 网模型的可选的示意图;
图9为本发明实施例提供的一种配电网信息物理系统融合建模的可选的流程图;
图10为本发明实施例提供的一种配电网信息物理仿真平台总体架构的可选的示意图;
图11为本发明实施例提供的一种配电网信息物理系统快/中/慢动态元件分类的可选的示意图;
图12为本发明实施例提供的一种分解优化模型的可选的示意图;
图13为本发明实施例提供的一种配电网信息物理系统网络解耦的可选的示意图;
图14a为本发明实施例提供的一种元件与网络间的等效模型的可选的示意图;
图14b为本发明实施例提供的另一种元件与网络间的等效模型的可选的示意图;
图15为本发明实施例提供的一种基于插值法的仿真数据更新模式的可选的示意图;
图16a为本发明实施例提供的一种多时间尺度信息交互的可选的示意图;
图16b为本发明实施例提供的另一种多时间尺度信息交互的可选的示意图;
图17为本发明实施例提供的一种自适应步长调整的数据交互模块的可选的示意图;
图18为本发明实施例提供的一种最大仿真步长计算的可选的示意图;
图19为本发明实施例提供的一种仿真步长自适应机制的可选的示意图;
图20为本发明实施例提供的一种配电网信息物理仿真算例分析的可选的示意图;
图21为本发明实施例提供的一种基于蒙特卡洛方法的配电网信息物理系统可靠性分析评估的可选的流程图;
图22a为本发明实施例提供的一种串联式单元可靠性的可选的框图;
图22b为本发明实施例提供的一种并联式单元可靠性的可选的框图;
图22c为本发明实施例提供的一种表决式单元可靠性的可选的框图;
图23为本发明实施例提供的一种配电网仿真系统的可选的结构示意图;
图24为本发明实施例提供的一种配电网仿真设备组成结构示意图。

具体实施方式

下面将结合本发明实施例中的附图, 对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述。应

当理解的是，此处所描述的一些实施例仅仅用以解释本发明的技术方案，并不用于限定本发明的技术范围。

为了更好地理解本发明实施例中提供的配电网仿真方法，在对本发明实施例的技术方案进行介绍之前，先对应用背景和相关技术进行说明。

电力信息物理系统需要研究如何深度融合电力系统与信息系统，探索交互影响机理，研究与之相适应的建模、分析与控制方法，并指导实际电力系统的应用。然而，在相关技术的理论方法与框架下，难以深入分析信息系统对电力系统分析与控制的影响，相关电力系统架构已经不再使用，因此，需要对电力信息物理系统的架构体系进行研究。示例性的，可以根据电力信息物理系统原型特征构造其模型以支撑相关计算、仿真，进而实现对相关理论、应用问题研究的辅助、测试、验证等目，并且准确构建包含信息侧与物理侧常用元件、设备、系统、事件流、信息流、接口等的模型库，建立兼容电力系统离散时步仿真体系与信息通信系统事件队列仿真体系的信息融合仿真方法。

对于电力系统，可以包括输电网与配电网。其中，配电网更贴近于用户，同时由于近年来清洁能源与新型负荷的接入，配电网拓扑复杂多变、节点规模庞大、源荷波动性、随机性强的特点更加显著。为进一步加强对于配电网的观测与控制，随着量测技术、通信技术、计算机技术的发展，配电网中的测点数量、测量数据量、通信数据量、控制指令数据量均呈现指数级的增长，因此，需要对配电网信息物理融合程度进行研究。

配电网信息物理系统融合建模方法可以从以下三个方面展开：（1）将通信信息的作用效果作为输入量考虑到物理过程中进行建模与控制，侧重将信息元素加入到传统的物理模型中，但该种思想未能全面考虑信息通信对物理系统的影响。（2）信息物理交互影响过程分析与控制，侧重针对闭环控制过程中解决离散信息过程和连续物理过程之间的交互影响建模、分析与控制。该方法更加侧重于对信息映射关系的描述，但缺乏信息侧对物理侧影响传播过程及影响结果的研究。（3）信息物理耦合过程的建模与分析，侧重对信息物理耦合特性（包括路径、性能）的建模、定量分析与控制。但目前此方面的研究方法多针对业务，建模与分析方法没有形成完整的框架体系，适应性不足。

对于配电网信息物理仿真平台架构体系方面，传统仿真工具通常采用离散时步对系统当前状态进行相对精确的估计。而信息通信系统仿真工具通常采用离散状态模型对网络在离散参数和事件进行描述，将复杂的通信过程转化为事件队列，通过离散事件仿真工具进行模拟。由于两个系统在数学模型上的本质区别，因此需要一套完整可靠的统一仿真软件。相关技术中存在不同架构的联合仿真平台方案。从平台组成结构，这些方案可分为以下三类：（1）联立仿真：联立仿真方案的思想是在单一仿真工具（电力系统仿真工具或通信系统仿真工具）中建立一个复杂的电力和信息通信复合系统模型。这种方法的关键在于在电力（或通信）系统仿真工具中搭建通信（或电力）系统模型。其优势在于，由于是在同一个仿真工具中运行，两个系统模型处于同一时间域，因此不需要额外的时间同步工作。虽然这类方案不需要面对时间同步问题，但无法处理动力学 DAE 系统复杂的时间连续的动态问题建模及机电特性仿真。（2）非实时混合仿真：电力通信复合系统仿真的另一个解决方案是采用混合仿真。两个系统的建模工作仍采用其各自的专业仿真软件完成，通过时间同步方法使两个软件能够运行于同一时间域。这也是当前电力和信息通信复合系统仿真平台的研究方向。但该方法涉及的软件接口、数据交互和仿真时间同步等问题仍未能得到合理的解决。（3）实时混合仿真：电力和信息通信系统均采用能够实时运行的仿真软件，因此形成在物理时间域上的天然同步。这类仿真方案与非实时混合仿真的区别是采用多处理器分布式实时仿真平台，能够在实时范围内对系统动态特性进行精确模拟。实时混合仿真方案面向的应用与非实时混合仿真类似，但能够更高效的得到精确结果。但是，该平台的建设复杂程度高、消耗资源多。

在配电网信息物理系统仿真方面，相关技术中研究其应用时，大部分集中在电力和通信等基础设施关联性研究以及电力系统和通信系统的交互影响、电力系统的安全稳定性研究。研究电力和通信等基础设施关联性，往往采用大粒度，大时间同步间隔，用于分析电力行业的基础设施和通信基础设施间交互作用和相互依存关系的问题。研究电力系统和通信系统的交互影响，分析电力系统的安全稳定性，这类仿真系统是面向电力行业的专业性仿真，其仿真颗粒度小、仿真同步时间间隔小（毫秒级或秒级），可以为电力系统的控制和管理做决策。与上述仿真系统不同，这类仿真系统还没有相应的成熟产品，相关系统的开发还处于研究和完善的过程中。

本发明实施例提供一种配电网仿真方法，如图 1 所示，图 1 为本发明实施例提供的一种配电网仿真方法的步骤流程图，该方法是一种信息物理深度融合的配电网仿真方法，应用于配电或用电的装置及系统，配电网仿真方法包括以下步骤：

S101、根据配电网中信息系统与物理系统之间的模型差异性、交互影响，以及多场景仿真验证

的规模和精度,进行多层次、多尺度的平台架构建模,得到仿真平台架构。

在本发明实施例中,针对配电网信息物理融合仿真平台架构研究匮乏的现状,考虑配电网中信息系统和物理系统之间的交互影响及多场景仿真验证的规模和精度,提出映射实际电网信息物理系统的多层次、多尺度综合仿真平台架构,为配电网信息物理系统故障分析和可靠性评估等场景提供了技术保障。

S102、在仿真平台架构上,根据配电网中物理系统与信息系统之间的耦合特性,对时变信息、非确定条件下的信息物理仿真系统进行融合建模,得到配电网信息物理系统。

在本发明实施例中,针对配电网及其中新型设备信息物理融合模型构建困难的问题,面向物理系统,提出了基于有限状态机的配电混合网信息物理融合建模技术和交互元件的多分辨率多层次柔性模型构建方法,形成支撑不同模态配电网运行的仿真模型库;面向通信网络,提出了支撑物理信息系统交互的通信网络物理层和数据链路层模型、可扩展的通信应用层模型、关键事件流和信息流过程模型的构建方法,形成支持多种典型协议的跨应用、跨节点数据流模型库;面向信息系统,构建了涵盖网络防护单元和网络攻击路径的信息系统模型。实现了时变信息、非确定条件下配电网信息物理模型的构建,具有灵活性好、精度高和自适应性强的特点,可为信息物理深度融合的配电网仿真系统高级应用提供多时空尺度模型支撑。

S103、基于仿真平台架构,在物理系统、通信网络及信息系统的并发故障场景下,对配电网信息物理系统进行实时仿真,确定配电网的故障仿真结果;故障仿真结果用于向配电网信息物理系统的故障隔离决策和故障恢复决策提供支持。

S104、基于仿真平台架构,利用可靠性评估指标对配电网信息物理系统进行可靠性仿真评估,确定配电网的可靠性仿真结果。

在本发明实施例中,面向基于信息物理系统的多场景仿真分析迫切需求,基于所构建配电网信息物理系统模型及所设计的仿真平台架构,采用仿真分解协调技术、多速率实时仿真方法和计算速度动态调节方法,提出物理系统、通信网络及信息系统并发故障场景下配电网物理节点实时仿真方法,为配电网信息物理系统故障隔离和故障恢复提供技术和辅助决策支撑;构建了配电网物理系统与信息系统的可靠性评价指标,提出了配电网信息物理系统可靠性仿真分析方法,实现了系统可靠性精准量化分析与提升。

本发明实施例面向新型电力系统,提出一种集成信息物理融合建模、仿真平台架构构建、故障仿真及可靠性仿真等功能的配电网信息物理深度融合仿真系统。考虑配电网物理系统与信息系统之间耦合特性,实现时变信息、非确定条件下的配电网信息物理融合建模;考虑配电网信息系统与物理系统的模型差异性及交互延时性,实现配电网信息物理系统多层次、多尺度综合仿真平台的构建;通过物理系统、通信网络及信息系统并发故障场景下配电网物理节点的仿真,为配电网信息物理系统故障隔离和故障恢复提供技术和辅助决策支撑;通过配电网信息物理系统的可靠性仿真评估,实现系统可靠性精准量化分析与提升。

根据本发明实施例提供的方案,根据配电网中信息系统与物理系统之间的模型差异性、交互影响,以及多场景仿真验证的规模和精度,进行多层次、多尺度的平台架构建模,得到仿真平台架构,增加了仿真平台的灵活加载功能、实时同步通信功能和功能构建功能,可以实现事件驱动与连续时间响应的配电网信息物理系统协同仿真。在仿真平台架构上,根据配电网中物理系统与信息系统之间的耦合特性,对时变信息、非确定条件下的信息物理仿真系统进行融合建模,得到配电网信息物理系统,通过多场景、多分辨率、多响应时间尺度下模型构建,提高了配电网信息物理系统的多样性。基于仿真平台架构,在物理系统、通信网络及信息系统的并发故障场景下,对配电网信息物理系统进行实时仿真,确定配电网的故障仿真结果;故障仿真结果用于向配电网信息物理系统的故障隔离决策和故障恢复决策提供支持,满足了配电网信息物理系统的多场景仿真分析的需求。基于仿真平台架构,利用可靠性评估指标对配电网信息物理系统进行可靠性仿真评估,确定配电网的可靠性仿真结果,为配电网可靠性提高提供了理论支撑与决策辅助,维护了配电网的稳定可靠运行,提高了配电网信息物理系统的适应性。

在一些实施例中,上述图1中S102还可以包括S1021-S1025。

S1021、基于配电网动态等值模型和支撑不同模态配电网运行的仿真模型库,构建物理系统模型。

在一些实施例中,上述S1021中支撑不同模态配电网运行的仿真模型库可以通过以下方式实现:基于有限状态机的配电混合网信息物理融合建模方法和物理侧交互元件的多分辨率多层次柔性模型构建方法,形成支撑不同模态配电网运行的仿真模型库。

在本发明实施例中，物理系统模型包括配电网动态等值模型、物理侧交互元件的多分辨率多层次柔性模型和支撑不同模态配电网运行的仿真模型库，以下分别进行说明。

在本发明实施例中，对于配电网动态等值模型，考虑大规模电力系统仿真精度和求解规模的矛盾，提出基于动态相量法的配电网混合网等值建模方法，如图 2 所示，图 2 为本发明实施例提供的一种基于动态相量法的配电网混合网等值建模的可选的流程图，建模方法的步骤包括 S11-S18。

S11、选择系统阶数，初始化。

选择系统阶数，并设置各个计算量的初值。

S12、构造动态相量网络导纳矩阵。

S13、检测网络拓扑是否改变，若改变，则执行 S12，即需要修改网络导纳矩阵，若未改变，则执行 S14。

S14、计算电压数值（当前时刻的电压数值），并进行时域到动态相量域的转换。

S15、网络求解。

已知上一时刻的电压电流方程的电流动态相量值和此刻的已知电压量，通过降阶的动态相量方程，分别计算节点电压的各阶动态相量值。

S16、更新动态相量值，由节点电压量求出所有支路的电流。

S17、各阶动态相量域到时域的转换

对各阶动态相量值进行从量域到时域的转换。

S18、检测是否达到仿真结束时刻。若是，则仿真结束，若否，即未达到结束时刻，则向前推移一个时间步长，返回 S13 继续循环执行 S13-S18。

在本发明实施例中，物理侧交互元件的多分辨率多层次柔性模型包括交互元件的高分辨率模型和低分辨率模型。交互元件高分辨率建模可以采用状态空间法，其包括基于对象运行物理规律建立的模拟模型和基于对象输入输出实测数据建立的数字模型。交互元件低分辨率建模可以采用开关周期平均建模法，为针对建模对象建立其开关模型，然后对开关模型在一个开关周期进行平均获得。

在本发明实施例中，支撑不同模态配电网运行的仿真模型库可以基于配电网混合网络的动态等值建模方法与多分辨率多层次柔性建模技术构建，模型库索引如下：（1）模型库一级目录可以有配电网设备模型、负荷模型、电力电子设备模型和分布式电源模型等。（2）配电网设备模型下的二级目录可以有线路、变压器、断路器、熔断器、杆塔/支架、分段开关、隔离开关、智能终端、避雷器、互感器、电机等配电网中典型设备的模型。（3）负荷模型下的二级目录可以有恒阻抗负荷、恒功率负荷、恒流模型、多项式模型等配电网常用负荷的模型。（4）电力电子设备模型二级目录可以有整流器、逆变器、斩波器、交-交变换器等典型电力电子变换设备的模型。（5）分布式电源模型二级目录可以有光伏发电、风力发电、小型水电、燃气轮机、储能设备、恒功率电源、V/F 控制型电源等现有配电网常用分布式电源的模型。

S1022、基于支持多种典型协议的跨应用、跨节点的数据流模型库，构建通信网络模型。

在一些实施例中，上述 S1022 中支持多种典型协议的跨应用、跨节点的数据流模型库可以通过以下方式实现：根据用于支撑物理信息系统交互的通信网络物理层模型和数据链路层模型、通信应用层模型、关键事件流和信息流过程模型的构建方法，形成支持多种典型协议的跨应用、跨节点的数据流模型库。

在本发明实施例中，通信网络模型包括支撑物理信息系统交互的通信网络物理层和数据链路层模型、可扩展的通信应用层模型、关键事件流和信息流过程模型以及支持多种典型协议的跨应用、跨节点数据流模型库，以下分别进行说明。

在本发明实施例中，通信网络物理层模型包括同步数字体系（Synchronous Digital Hierarchy, SDH）网络物理层模型和无线专网物理层模型。其中，SDH 网络物理层模型可以基于网络仿真技术软件包（例如，OPNET）中已有的信道模型进行派生。无线专网物理层模型可以基于 OPNET 软件构建，可以包括九个阶段：接收器组计算阶段；传输时延阶段；链路封闭性计算阶段；发送天线增益阶段；传播时延阶段；接收天线增益阶段；接收功率计算阶段；背景噪声功率计算阶段；干扰噪声功率计算阶段。

在本发明实施例中，数据链路层建模基于 OPNET 软件构建，可以包括 5 个阶段：链路匹配阶段；信噪比计算阶段；误码率计算阶段；误码数目分配阶段；纠错阶段。

在本发明实施例中，可扩展的通信应用层模型构建步骤包括：自定义任务建模、应用模型设定和角色设定。

在本发明实施例中，对于关键事件流和信息流过程模型，以分布式拒绝服务攻击（Distributed

Denial of Service, DDOS) 为例, 配电网信息物理系统关键事件流和信息流过程模型构建步骤包括: 搭建 DDOS 场景、配置攻击配置文件 (Attack Profiles)、配置影响脚本 (Effect Scripts)、配置补救措施概要文件 (Remedy Profiles)、设置统计量和运行仿真。

在本发明实施例中, 支持多种典型通信协议的跨应用、跨节点数据流模型库基于 OPNET 软件开发, 其步骤可以包括: 修改环仿真 (software in the loop, SITL) 模块代码、构建控制节点、修改终端节点模型和定义数据包结构。

S1023、基于通信网络模型, 对多源信息进行预处理, 结合信息网络安全模型, 构建信息系统模型。

在本发明实施例中, 信息系统模型包括配电网信息物理系统多源信息预处理、信息网络安全模型。其中, 多源信息预处理包括传感器数据预处理、网络数据预处理以及多状态信息控制模型构建。传感器数据预处理和网络数据预处理均包括异常数据检测和异常数据修正。多状态信息控制模型可通过多状态马尔科夫 (Markov) 模型来表达, 可以包括以下步骤: 确定每个单一状态的统计模型; 建立移动通信信道 Markov 模型。

在本发明实施例中, 移动通信信道 Markov 模型可描述成转移矩阵 P 和状态向量 S , n 状态的 Markov 转移矩阵如公式 (1) 所示。

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & \cdots & p_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ p_{n1} & \cdots & p_{nn} \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (1)$$

上述公式 (1) 中, p_{ij} 表示由状态 i 转移到状态 j 的转移概率且满足公式 (2)。

$$\sum_{j=1}^n p_{ij} = 1 \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

状态向量 $S=[s_1, s_2, \dots, s_n]$, 由于此时的 Markov 链是非周期、不可约的, 它的稳态分布存在且等于极限分布, 可得到公式 (3)。

$$SP = S \quad (3)$$

在上述公式 (3) 中, 稳态分布表示状态向量 S 与转移矩阵 P 之间的乘积等于状态向量 S 。

在本发明实施例中, 网络安全模型包括网络防护单元模型和网络攻击路径模型。其中, 网络防护单元模型基于 Petri 网构建, 包括防火墙模型、密码模型、认证模型和网络设备配置管理模型, 以下分别进行说明。

在本发明实施例中, 对构建网络防护模型进行说明, 网络防护模型也可以称为防火墙模型 Petri 网模型, 如图 3 所示, 图 3 为本发明实施例提供的一种防火墙模型 Petri 网模型的可选的示意图, 图 3 中示出了多种不同方式的入侵尝试。模型每个瞬时变迁都附加了一个防火墙渗透概率, 其值可由防火墙日志计算得出。恶意包经由每条规则通过防火墙的概率可由公式 (4) 计算。

$$P_{i,j}^{fp} = \frac{f_{i,j}^{fp}}{N_{i,j}^{fp}}; p_i^{fr} = \frac{f_i^{fr}}{N_i^{fr}} \quad (4)$$

上述公式 (4) 为防火墙 i 处经策略规则 j 通过的恶意包 (即图 3 中通过防火墙的恶意包), 其中 $f_{i,j}^{fp}$ 表示通过防火墙的频率, $N_{i,j}^{fp}$ 是防火墙规则 j 的总记录数。 f_i^{fr} 是被拒绝的包的数量, N_i^{fr} 是防火墙记录的总数。防火墙执行速度 λ_i^f 是每秒执行的指令数, 可用于估计验证规则和通过防火墙的时间。平均响应速度 λ_i^{mr} 取决于网络传输状况。

在本发明实施例中, 对构建密码模型进行说明, 密码模型由两部分组成: 登录尝试概率和响应速度, 其模型如图 4 所示, 图 4 为本发明实施例提供的一种密码模型的可选的示意图。

侵入尝试可用一个变迁概率表示, 变迁概率可由下公式 (5) 进行描述。

$$p_i^{pw} = \frac{f_i^{pw}}{N_i^{pw}} \quad (5)$$

上述公式 (5) 中 f_i^{pw} 为侵入尝试数, N_i^{pw} 为总记录数计算。一次在特定时间间隔内的成功登录, 不被算作入侵尝试次数。

在本发明实施例中, 对构建认证模型进行说明, 以 USB 关键信息 (key) 作为加密硬件为例建

立认证模型, 经 USB key 硬件加密的身份认证典型过程如下: 初始化阶段, 服务器和终端用户通过安全的方式共享存有 Key 的硬件; 运行中, 进行身份认证时, 服务器产生随机数发给终端, 终端进行散列运算并把结果发回服务器; 服务器将储存的 Key 和随机数进行散列运算并与收到的结果比较, 结果一致则说明通过认证。

在本发明实施例中, 参照此身份认证过程, 建立如图 5 的硬件加密身份认证攻击模型, 图 5 为本发明实施例提供的一种伪造身份认证攻击过程模型的可选的示意图。其中, 图 5 中的 λ^s 表示以各种手段偷取一个系统内已在使用的 USB key 硬件所需要的时间, λ^c 表示复制一个新的 USB key 硬件所需要的时间, λ^f 表示系统更换 USB key 硬件的周期。 λ^r 表示成功获取到一个服务器发来的随机数需要的时间, λ^a 表示服务器校验终端发回信息所需要的时间。

在本发明实施例中, 对构建网络设备配置管理模型进行说明, 考虑攻击者可能采取的攻击方法步骤, 建立如图 6 所示端口管理 Petri 网模型, 图 6 为本发明实施例提供的一种端口管理 Petri 网模型的可选的示意图。图 6 中的 p^v 表示闲置端口没有被关闭的概率, p^i 表示取得了正常工作端口的使用权限, 通过正常端口可以发送恶意攻击包的概率, p^f 示端口管理机制没有出现漏洞被攻击者利用的情况的概率。

在本发明实施例中, 网络攻击路径建模包括虚假信息注入攻击建模和伪造指令攻击建模。其中, 虚假数据注入攻击模型如图 7 所示, 图 7 为本发明实施例提供的一种虚假数据注入攻击信息 Petri 网模型的可选的示意图。虚假数据的传输从终端层开始上传主站的过程中, 经过了变电站与终端间防火墙、主站与变电站间防火墙以及纵向加密认证设备, 将这些防护设备的 Petri 网模型串联, 可得虚假数据注入攻击传播过程的 Petri 模型。伪造指令攻击模型如图 8 所示, 图 8 为本发明实施例提供的一种含虚假拉合闸命令的攻击过程 Petri 网模型的可选的示意图。以虚假拉闸命令为例, 伪造指令攻击流程可以有: 获取拉闸命令的密文; 建立与表计的通信, 通过无线网络等获取表计处接入网线; 发出命令报文。

S1024、基于关联矩阵、物理系统模型、通信网络模型和信息系统模型, 进行系统融合建模, 得到融合系统。

S1025、基于设备的有限状态机和系统的有限状态机, 分别对融合系统中设备的有限状态机模型和系统的有限状态机模型进行构建, 得到配电网信息物理系统。

在本发明实施例中, 在构建物理系统模型、通信网络模型和信息系统模型之后, 对信息物理系统融合建模进行说明, 配电信息物理融合建模包括基于关联矩阵的系统融合建模和基于有限状态机的信息物理系统建模, 以下分别进行说明。

在本发明实施例中, 基于关联矩阵的信息物理系统融合建模可以通过以下方式实现。(1) 针对配电网信息物理系统, 分别构建其物理矩阵 P、通信网络矩阵 C、二次设备网矩阵 S 和信息控制矩阵 I。(2) 基于通信网络和二次设备之间的关联关系, 建立二次设备层网络模型。(3) 基于物理系统与二次设备之间的关联关系, 建立二次设备-物理节点关联模型; 基于信息系统与二次设备之间的关联关系, 建立二次设备-信息节点关联模型。(4) 综合物理矩阵 P, 通信网络矩阵 C, 二次设备网矩阵 S、信息控制矩阵 I, 以及它们之间的关联矩阵, 构建配电网信息物理融合模型 (即配电网信息物理系统)。

在本发明实施例中, 基于有限状态机的信息物理系统建模包括设备的有限状态机模型和系统的有限状态机模型。设备的有限状态机模型可以通过以下方式实现。(1) 分析配电网中设备有限状态集合及其工作特性, 包括其工作状态 (例如启动、停运、异常等)、运行特性与输入/输出量, 并定义各类工作状态的函数表达式。(2) 分析电力及信息各类设备在不同外部驱动条件下的状态转换规则, 定义设备级模型与系统级模型的接口变量, 通过接口变量实现对设备级模型的事件驱动。(3) 基于有限状态机理论定义设备的各类属性, 包括有限状态集合、各状态下的工作函数集合、状态转换规则、状态迁移函数、初始状态集合等, 构建设备的有限状态机模型。

在本发明实施例中, 系统的有限状态机模型可以通过以下方式实现。(1) 依据配电网信息物理系统的通信拓扑、电网一次拓扑、信息节点-二次节点-一次节点之间的业务连接, 构建信息设备的有限状态机模型与物理设备的有限状态机模型之间的静态网络拓扑。(2) 依据设备有限状态机模型在不同工作状态下的工作函数, 定义有限状态机网络中各有向边的量化权重; 依据有限状态机模型的状态转换规则, 设计有限状态机网络中各节点的状态迁移规则。(3) 依据特定业务场景的业务规则, 对有限状态机网络中非必要设备和连接关系进行约减, 再将配电网信息物理系统运行的初始参数输入到有限状态机网络, 构建系统有限状态机模型。

在本发明实施例中，配电网信息物理系统融合建模方法整体流程如图 9 所示，图 9 为本发明实施例提供的一种配电网信息物理系统融合建模的可选的流程图。其中，物理系统建模包括基于动态相量法的配电混合网等值仿真建模、交互元件的多分辨率多层次柔性模型和支撑不同模态配电网运行的仿真模型库；通信网络建模包括通信网络物理层模型、数据链路层模型、事件流和信息流过程模型；信息系统建模包括多源信息预处理、网络防护单元模型和网络攻击路径模型。然后，在物理系统建模、通信网络建模和信息系统建模的基础上，基于时空关联矩阵的信息物理系统融合建模；以及基于有限状态机的信息物理系统建模。

在本发明实施例中，构建了配电网信息物理系统融合仿真模型，包括基于有限状态机的配电混合网信息物理融合模型、配电网交互元件多分辨率多层次柔性模型；支撑物理信息系统交互的通信网络物理层和数据链路层模型、可扩展的通信应用层模型、关键事件流和信息流过程模型；涵盖网络防护单元模型和网络攻击路径模型的信息系统模型。解决了配电网信息物理系统多场景、多分辨率、多响应时间尺度下模型构建的技术问题，为后续信息物理深度融合高级仿真应用提供模型支撑，提高了配电网信息物理系统的适应性。

在一些实施例中，仿真平台架构包括模型层、数据层、算法层、接口层和业务层；接口层用于连接配电网的物理侧与信息侧；该配电网仿真方法还包括以下步骤：在模型层中，针对配电网的物理侧，采用平均化方法与动态相量法进行模型构建，得到配电网动态等值模型；针对配电网的信息侧，采用脚本方法，对关键事件流和信息流进行模型构建，得到关键事件流和信息流过程模型；并构建通信网络物理层模型、数据链路层模型、通信应用层模型和信息网络安全模型；在数据层中，对模型构建过程和仿真过程中的数据进行数据采集、数据处理和数据存储；业务层包括仿真功能模块和应用场景验证模块，仿真功能模块用于支持配电网信息物理系统的暂态仿真功能、配电网信息物理系统的稳态仿真功能、通信网络及通信网络故障仿真功能；场景验证模块用于支持配电网信息物理系统的并发故障场景验证、配电网信息物理系统的可靠性分析仿真、配电网的信息侧攻击与故障场景验证。

在一些实施例中，基于上述仿真平台架构中的模型层、数据层、算法层、接口层和业务层，上述图 1 中 S103 还可以通过以下方式实现。在算法层中，采用仿真网络分解协调技术、多速率并行实时仿真方法和计算速度动态调节方法，在物理系统、通信网络及信息系统的并发故障场景下，对配电网物理节点进行实时仿真，确定配电网的故障仿真结果。

在本发明实施例中，配电网信息物理仿真平台总体架构采用分层架构模式，可以包括模型层、数据层、算法层、接口层、业务层，同时包含平台管控模块和应用程序界面（Application Program Interface, API）接口模块，如图 10 所示，图 10 为本发明实施例提供的一种配电网信息物理仿真平台总体架构的可选的示意图。

在本发明实施例中，模型层用于提供配电网信息物理融合仿真所需的物理模型、通信模型和信控模型；在物理侧，采用平均化思想与动态相量法进行模型构建，可在兼顾仿真计算精度的前提下，提升计算速度与效率，优化计算资源；在通信侧采用脚本的方式对关键事件流和信息流进行模型构建。

在本发明实施例中，数据层包括数据采集模块、数据处理与管理模块、数据转换模块与数据存储模块。其中，数据采集模块的功能可以是与 PMS3.0 平台、数据采集与监视控制系统（Supervisory Control And Data Acquisition, SCADA）、用采系统等数据采集系统相连并为信息物理仿真平台采集所需数据；数据处理与管理模块的功能可以是针对现有配电网数据来源多、种类多、精度差等问题进行数据异常辨识与数据修复；数据转换模块的功能可以是将所采集之不同格式、不同形式的数据转换为仿真平台可识别的格式；数据存储模块的功能可以是将来采集数据、内部计算结果数据、模型数据等数据进行存储，由图形库和属性数据库组成，存储于 Oracle/Access 数据库内，提供基础支撑系统与基础通用数据服务，数据持久化、数据库访问能力，供平台层调用。

在本发明实施例中，算法层包括配电网信息物理仿真计算速度动态调节模块、多速率并行仿真模块、配电网网络分解模块。其中，计算速度动态调节模块的功能可以是综合考虑计算精度、拓扑规模、计算速度，对计算步长进行实时选取，以获得计算精度与计算效率的最大收益；多速率并行仿真模块的功能可以是完成不同仿真步长需求的元件、设备、系统之间的数据、信息交互。该模块与计算速度动态调节模块相互配合，可实现计算资源的高效配置。配电网网络分解模块的功能可以是生成适合的分网原则、分网策略与分割接口算法，以实现大规模配电网拓扑的有效分解与并行计算。

在本发明实施例中，接口层用于提供配电网物理侧与信息通信侧之间的接口。

在本发明实施例中，业务层包括该仿真平台可实现的仿真功能模块及应用场景验证模块，仿真功能模块用于支持配电网信息物理系统暂态仿真功能、配电网信息物理系统稳态仿真功能、通信系统及其故障仿真等功能；场景验证模块用于支持配电网信息物理并发故障场景验证、配电网信息物理系统可靠性分析仿真、DDOS 攻击、错误数据注入攻击（False Data Injection Attacks, FDIA）攻击等配电网信息侧攻击与故障场景验证。

在本发明实施例中，配电网信息物理系统稳态仿真功能通过以下方式实现，根据不同时段内负荷、分布式电源的不同功率值，定时按分时数据自动进行潮流计算。同时通过数据接口，实现潮流计算结果的同步。并且，监听主站下发的遥控变位、遥调等数据，实现云平台与主站的数据同步。可实现某一时间断面下的周期计算、故障计算、潮流计算、动态图绘制、负荷管理等功能。

在本发明实施例中，通信系统及其故障仿真功能通过以下方式实现，基于已构建、封装的通信系统及通信系统故障模型，可实现通信系统故障场景的快速创建与验证，复现通信系统故障的过程和效果，提高了配电网信息物理系统的适应性。

在本发明实施例中，配电网信息物理并发故障场景验证，可实现物理侧与信息通信侧同时发生故障的过程与效果重现。其中物理侧故障可实现三相接地短路故障、单相接地短路故障、相间短路故障、断线故障等常见故障，通信侧故障可实现 DDOS 攻击、FDIA 攻击、病毒入侵等引起的故障以及通信链路中断、通信延时等常见故障。

在本发明实施例中，配电网信息物理系统可靠性分析仿真，可实现信息侧、物理侧单侧故障或信息物理并发故障的可能性分析，进而可获得对应不同故障类型的配电网信息物理系统可靠性分析结果。

在本发明实施例中，通过分析配电网信息物理系统仿真的特征，提出了配电网信息物理系统仿真架构技术，包括配电网信息物理系统仿真平台多层次映射关系以及一体化构建方案、配电网信息物理系统仿真平台功能体系以及计算架构，解决了配电网信息物理系统仿真子系统灵活加载、功能构建、同步与高速通讯、扩展 API 接口等问题，解决了事件驱动与连续时间响应的配电网信息物理系统仿真协同的技术问题，为电网安全稳定分析、可靠性分析评估、故障处置等场景验证与决策辅助提供了有力的基础保障，提高了配电网信息物理系统仿真平台的适应性。

在本发明实施例中，基于所构建配电网信息物理系统模型及所设计的仿真平台架构，采用仿真分解协调技术、多速率实时仿真方法和计算速度动态调节方法，提出了物理系统、通信网络及信息系统并发故障场景下配电网物理节点实时仿真方法，满足了信息物理系统的多场景仿真分析迫切需求，为配电网信息物理系统故障隔离和故障恢复提供技术和辅助决策支撑；提高了配电网信息物理系统及其仿真平台的适应性。

在一些实施例中，上述图 1 中 S103 还可以包括 S1031-S1034。

S1031、根据不同元件动态响应时间或响应速度，对元件进行分类，得到各个元件的元件类型；其中，元件类型包括快类型、中间类型和慢类型，中间类型对应的仿真步长大于快类型对应的仿真步长，且小于或等于慢类型对应的仿真步长。

在本发明实施例中，针对目标配电网，按照其中元件的不同时间响应速度，将其分为快、中、慢三类，如图 11 所示，图 11 为本发明实施例提供的一种配电网信息物理系统快/中/慢动态元件分类的可选的示意图。

示例性的，快时间尺度仿真步长在 10 微秒-100 微秒之间，代表元件有含电力电子元件的光伏等分布式电源、柔性电力电子设备等。中时间尺度的仿真步长在 100 微秒-1 毫秒之间，代表元件有以柴油机、电动机为代表的旋转设备。慢时间尺度的仿真步长在毫秒以上，代表元件有电容器、电抗器、变压器、控制系统等不包含电力电子元件的电气系统其他元件。

S1032、对配电网中分类后的元件进行建模。

在本发明实施例中，采用上述所描述的配电网信息物理系统的建模方法，根据上述 S102 中所描述的配电网信息物理系统的构建方法，对所分类的配电网元件进行建模，得到包含各个元件的配电网信息物理系统中的物理网络。

S1033、对包含各个元件的配电网信息物理系统中的物理网络进行动态解耦，并建立等效模型。

在一些实施例中，S1033 还可以通过以下方式实现。获取加载数据和中央处理器核心数量；根据加载数据和中央处理器核心数量进行暂态仿真，利用遗传算法，对计算线路的中央处理器数量和计算各个元件的中央处理器数量，进行分配，得到分配结果；分配结果包括各个中央处理器对应的节点类型、数量和所在的线路；根据分配结果，构建仿真任务分解模型；采用节点分裂法，对各个元件的配电网信息物理系统中物理网络对应的仿真任务分解模型，进行与各个元件的元件类型对应

的动态解耦, 得到解耦后的模型; 根据解耦后的模型, 构建各个元件的网络间的等效模型和元件与网络之间的等效模型; 等效模型包括网络间的等效模型和元件与网络之间的等效模型。

在本发明实施例中, 配电网信息物理系统故障仿真模型的构建包括针对目标配电网, 按照其中元件的不同时间响应速度, 将其分为快、中、慢三类、配电网元件建模, 以及配电网信息物理系统快/中/慢动态解耦。接下来对配电网信息物理系统快/中/慢动态解耦进行说明。

在本发明实施例中, 在对配电网信息物理系统进行快/中/慢动态解耦时, 仅针对物理网络进行快/中/慢动态解耦, 并建立相应的等效模型。配电网信息物理系统快/中/慢动态解耦包括配电网信息物理系统仿真任务分解模型和配电网信息物理系统网络解耦。

在本发明实施例中, 构建配电网信息物理系统仿真任务分解模型包括: 构建分解优化模型和采用遗传算法等智能算法对优化模型进行求解, 其中, 优化流程如图 12 所示, 图 12 为本发明实施例提供的一种分解优化模型的可选的示意图, 分解优化步骤包括 S21-S26。

S21、加载数据。

数据包括但不限于网络拓扑、馈线数、节点数和中央处理器 (central processing unit, CPU) 性能数据。

S22、用户输入。

用户输入包括但不限于参与计算的 CPU 核心数量 (对应于中央处理器核心数量)。

S23、暂态仿真 (对应于根据加载数据和中央处理器核心数量进行暂态仿真)。

S24、分配计算线路的 CPU 数和计算各暂态元件的 CPU 核心数。

S25、利用遗传算法计算暂态场景下各 CPU 核心仿真的不同类型节点数最优值 (对应于利用遗传算法, 对计算线路的中央处理器数量和计算各个元件的中央处理器数量, 进行分配, 得到分配结果)。

S26、输出分配结果。

分配结果包括但不限于各 CPU 参与计算的节点类型、数量及其所在馈线编号 (对应于分配结果包括各个中央处理器对应的节点类型、数量和所在的线路)。

在本发明实施例中, 在构建分解优化模型时, 确定参与传统负荷节点计算的 CPU 核心个数和参与暂态节点计算的 CPU 核心个数如公式 (6) 所示。

$$\begin{cases} n_{CPU_0} = \text{round}(n_{CPU} \times \frac{n_{1*}}{n \times n_{2*} + n_{1*}}) \\ n_{CPU_1} = n_{CPU} - n_{CPU_0} \end{cases} \quad (6)$$

上述公式 (6) 中, n_{CPU} 为参与计算的 CPU 核心总数, n_{CPU_0} 为参与传统负荷节点的 CPU 核心数, n_{CPU_1} 为参与暂态计算的 CPU 核心数; n_{1*} 为参与计算的传统负荷节点数, n_{2*} 为参与计算的暂态节点数; $\bar{n}$ 为将一个暂态模型等效成为的传统负荷节点数平均值。

若仿真系统内包含 q 种不同类型的暂态元件, 且每种元件的个数分别为 $n_{2k*} (k=1, 2, \dots, q)$, 则参与每种暂态元件计算的 CPU 核心个数如公式 (7) 所示。

$$\begin{cases} n_{CPU_{1k}} = \text{round}(n_{CPU_1} \times \frac{n_k \times n_{2k*}}{n \times n_{2*}}) \quad (k=1, 2, \dots, q-1) \\ n_{CPU_{1q}} = n_{CPU_1} - \sum_{k=1}^{q-1} n_{CPU_{1k}} \end{cases} \quad (7)$$

上述公式 (7) 中 $n_{CPU_{1k}}$ 为参与第 k 种暂态元件仿真计算的 CPU 核心总数; n_{2k*} 为参与计算的第 k 种暂态元件数; n_k 为将一个第 k 种暂态元件等效成为的传统负荷节点数, 且满足下述公式 (8)。

$$n_{2*} = \sum_{k=1}^q n_{2k*} \quad (8)$$

上述公式 (8) 中取 $q=2$, n_{CPU_0} 、 $n_{CPU_{11}}$ 、 $n_{CPU_{12}}$ 分别为使用长步长、中步长、短步长仿真的 CPU 个数, 采用如公式 (9) 中的目标函数。

$$\begin{cases} \min Fun = Fun_1 + Fun_{21} + Fun_{22} \\ Fun_1 = \sum_{i=1}^{n_{CPU0}} [P_1(m_{ib} - m_{ia}) + P_2(n_{i1*} - n_i)^2] \\ Fun_{21} = \sum_{j=1}^{n_{CPU1}} [P_1(m_{jb} - m_{ja}) + P_2(n_1 \times n_{1j2*} - n_j)^2] \\ Fun_{22} = \sum_{j=1}^{n_{CPU2}} [P_1(m_{jb} - m_{ja}) + P_2(n_2 \times n_{2j2*} - n_j)^2] \end{cases} \quad (9)$$

上述公式(9)中: P_1 为第一级优化目标的权重系数, P_2 为第二级优化目标的权重系数, $P_1 > P_2 > 0$; m_{ia} 为第 i 个 CPU 核心计算的首条馈线编号, m_{ib} 为第 i 个 CPU 核心计算的末条馈线编号, n_i 为第 i 个 CPU 核心最优计算量, n_{i1*} 为本次迭代第 i 个 CPU 核心参与计算的传统负荷节点数, $i=1, 2, \dots, n_{CPU0}$; m_{ja} 为第 j 个 CPU 核心计算的首条馈线编号, m_{jb} 为第 j 个 CPU 核心计算的末条馈线编号, n_j 为第 j 个 CPU 核心最优计算量, n_{kj2*} 为本次迭代第 j 个 CPU 核心参与计算的第 k 种暂态元件数, $j=1, 2, \dots, n_{CPU1}$ 。约束条件为配电网信息物理系统的运行约束。

在本发明实施例中, 在对配电网信息物理系统网络进行解耦时, 可以采用节点分裂法对配电网信息物理系统网络进行解耦, 如图 13 所示, 图 13 为本发明实施例提供的一种配电网信息物理系统网络解耦的可选的示意图, 包括 S31-S38。

S31、选取分割节点, 设置收敛判据 δ , 令 $k=1$ 。

S32、输入子系统线路拓扑参数、负荷参数, 计算 ZIP 模型三部分参数。

S33、考虑负荷恒阻抗部分, 计算各子系统节点导纳矩阵。

S34、潮流计算得节点电压初始值 U_i^k 。

需要说明的是, S33 和 S34 的执行顺序不分先后, 可以同时执行 S33 和 S34, 也可以先执行 S33, 然后执行 S34, 也可以先执行 S34, 然后执行 S33, 对此本发明实施例不做限制。

S35、计算 k 次迭代边界电流值 i_δ^k 。

S36、将 i_δ^k 回代, 计算 $k+1$ 次迭代节点电压相量 U_i^{k+1} , $k+1$ 次节点注入电流相量 I_δ^{k+1} , 计算 $k+1$ 次迭代边界电流值 i_δ^{k+1} 。

S37、判断 $\Delta i = (i_\delta^{k+1} - i_\delta^k) \leq \delta$ 是否成立, 若成立, 则执行 S38, 若不成立, 则 $k=k+1$, 循环执行 S36, 直至公式成立。

S38、 i_δ^{k+1} 即为所求联络支路电流值, 解耦流程结束。

示例性的, 配电网信息物理系统网络解耦包括以下步骤: (1) 在保证子网的计算规模均衡前提下, 选取网络中某些节点为分割节点, 将网络分割为若干个相互独立的子系统, 子系统间仅通过分割节点的联络支路电流进行信息交互。(2) 针对各子系统, 分别建立 ZIP 负荷模型, 计算恒阻抗、恒电流、恒功率三部分参数, 恒阻抗负荷部分参数用于求解节点导纳矩阵, 恒电流、恒功率负荷部分参数用于求解节点注入电流相量。(3) 计算各子系统的节点导纳矩阵, 考虑到配电网节点导纳矩阵为奇异矩阵, 采用本发明所提方法对节点导纳矩阵进行改进。(4) 联立连接子系统之间的支路电流方程与子系统内部的节点电压方程求出子系统之间联络支路上的电流。(5) 引入联络支路电流求出各子系统的节点电压相量, 不断迭代直至相邻两次的联络支路电流差小于收敛判据。

S1034、采用仿真分解协调方法、多速率并行实时仿真方法和计算速度动态调节方法, 对包含各个元件的物理网络等效模型进行故障实时仿真, 确定配电网的故障仿真结果。

在本发明实施例中, 配电网信息物理系统实时仿真方法包括仿真分解协调技术、多速率并行实时仿真方法和计算速度动态调节方法, 接下来对这三种方法分别进行介绍。

在本发明实施例中, 对于仿真分解协调技术, 配电网信息物理系统的仿真分解协调技术包括仿真分解元件等效模型和快/中/慢数据协调方法, 以下分别进行介绍。

在本发明实施例中, 配电网信息物理系统的仿真分解元件等效模型包括网络间的等效模型和元件及网络间的等效模型。

示例性的, 对于构建网络间的等效模型, 记串联电压源端口为 A 类端口, 用电流源代替, 称作

电流端口；记并联电流源端口为 B 类端口，用电压源代替，称作电压接口。如果端口 1 至端口 k 为 A 类端口，端口 $k+1$ 至端口 m 为 B 类端口，由叠加定理得到如下公式 (10)。

$$\begin{bmatrix} u_A \\ i_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{AA} & H_{AB} \\ H_{BA} & H_{BB} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ u_B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{eq} \\ I_{eq} \end{bmatrix} \quad (10)$$

上述公式 (10) 中 $u_A = [u_1 \cdots u_k]^T$ 为 A 类端口等效电压； $i_A = [i_1 \cdots i_k]^T$ 为 A 类端口等效电流源；

5 U_{eq} 为 A 类端口串联电压源； $i_B = [i_{k+1} \cdots i_m]^T$ 为 B 类端口等效电流； $u_B = [u_{k+1} \cdots u_m]^T$ 为 B 类端口等效电压源； I_{eq} 为 B 类端口并联电流源； H_{AA} 、 H_{AB} 、 H_{BA} 、 H_{BB} 为端口的等效阻抗。

示例性的，对于构建元件与网络间的等效模型，针对线路侧子网和分布式电源子网提出基于不同接口电气量的网络等效模型。如图 14a 所示，图 14a 为本发明实施例提供的一种元件与网络间的等效模型的可选的示意图，图 14a 为以注入电流为协调变量的线路侧等效模型，其中，R 表示电阻，
10 i 表示线路模型的电流，L 表示电感， u_s 表示电压， i_s 为分裂节点处的外网等效注入电流，线路侧子网外特性表示如公式 (11) 所示。

$$u_s = R(i - i_s) + L \frac{d(i - i_s)}{dt} \quad (11)$$

示例性的，对于构建元件与网络间的等效模型，如图 14b 所示，图 14b 为本发明实施例提供的另一种元件与网络间的等效模型的可选的示意图，图 14b 为以节点电压为协调变量的分布式电源子网等效模型，其中，R (Resistance) 表示电阻， u 表示暂态元件模型的电压，L 表示电感， u_s 表示电压， u_s 为分裂节点处的外网等效节点电压。分布式电源子网外特性表示如公式 (12) 所示。

$$u - u_s = Ri_s + L \frac{di_s}{dt} \quad (12)$$

在本发明实施例中，关于快/中/慢数据协调方法，由于并行计算的多子系统仿真步长不同，数据交互只能在最大仿真步长的整数倍时刻进行，使得小步长仿真系统难以得到每个时步开始时刻外部系统的仿真结果，难以保证信息交互的实时性。因此提出基于插值法的外部系统数据更新模式，实现快/中/慢数据的协调，如图 15 所示，图 15 为本发明实施例提供的一种基于插值法的仿真数据更新模式的可选的示意图。

在本发明实施例中，子系统 1 采用长仿真步长 T_1 ，子系统 2 采用短仿真步长 T_2 ，且 $T_1 = mT_2$ ， m 为正整数。在 t_n 时刻，子系统 1 向子系统 2 传递自身在 $[t_{n-2}, t_{n-1}]$ 时步内仿真结果 x_{n-1} 和在 $[t_{n-1}, t_n]$ 时步内的仿真结果 x_n ；子系统 2 向子系统 1 传递自身在 $[t_{n-1}, t_n]$ 时步内的仿真结果 y_n 。在 $[t_n, t_{n+1}]$ 时步内，子系统 1 利用外部系统状态量 y_n 进行一次迭代计算；子系统 2 利用外部系统状态量 x_{n-1} 和 x_n 进行插值，根据公式 (13) 依次得到 m 个外部系统状态量 $x_{n,1} \cdots x_{n,m}$ ，进行 m 次迭代计算。

$$x_{n,k} = x_{n-1} + \frac{k-1}{m}(x_n - x_{n-1}) \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (13)$$

在本发明实施例中，子系统 2 在仿真过程所利用的外部系统数据滞后于子系统 1 单位仿真步长 T_1 ，但其数据交互过程仍然具有实时性。

在本发明实施例中，对于多速率并行实时仿真方法，在同一仿真时段内对不同时间尺度元件采用不同仿真步长，配电网信息物理仿真系统多速率协调过程如图 16a 和图 16b 所示，图 16a 和图 16b 为本发明实施例提供的一种多时间尺度信息交互的可选的示意图。图 16a 中示出了被控对象 (simulink)、通信网络 (OPNET) 和控制器 (Matlab) 之间的交互过程，结合图 16b 中所示出的各个执行主体之间分别在快/中/慢不同类型的协调过程中时间 (包括 t_1 、 $t_2 \dots t_n$) 上的交互。其中，被控对象和控制器均是经过量测数据打包、用户数据报协议 (UDP, User Datagram Protocol)、sitl 接口、UDP 传输协议、控制信号解码。通信网络通过 sitl 接口与被控对象进行交互，并通过另一个 sitl 接口与控制器进行交互，子系统 1、子系统 2 分别采用短步长和中步长对不同时间暂态元件进行仿真；
35 子系统 3 包含馈线上的全部传统负荷节点，采用长步长仿真。

示例性的，由于不同暂态元件通常动态响应速度不同，其跟踪系统状态变化的能力也不同，因此，本发明实施例提出一种自适应变步长的多速率并行仿真技术，子系统内部自适应调整仿真步长，各子系统采用多种仿真步长并行仿真，在不大幅增加资源消耗量的基础上加速系统的暂态响应，保证各子系统的安全稳定运行。

示例性的, 在整个仿真过程中, 如果子系统 2 的仿真步长不断发生变化, 但双侧子系统仿真步长仍然满足 $T_1=mT_2$ 、 m 为正整数的关系, 根据插值算法, 利用延时模块记录子系统 1 上一仿真步长结束时刻的系统状态值, 采用三角波发生器完成每个大步长内插值系数 $\frac{k-1}{m}$ 的计算, 使子系统 2 能够在每一时步初始时刻得到经过更新的对侧子系统状态, 并开始新一轮迭代计算。

示例性的, 如图 17 所示, 图 17 为本发明实施例提供的一种自适应步长调整的数据交互模块的可选的示意图, From3 中的 V_{in} 表示子系统 1 按大步长间隔输出的电压状态量, Goto 中 V_{out} 表示子系统 2 经插值计算后得到的对侧子系统状态量。图 17 中 Transport Delay 表示传输时延, Repeating Sequence 表示周期序列, Add 和 Add1 表示加法器, Divide 表示分配器。图 17 示出的信号变换过程针对子系统 2 的变步长仿真具有普适性, 且能够实现双侧子系统间仿真数据的实时交互, 解决步长不匹配等技术问题。

在本发明实施例中, 对于计算速度动态调节方法, 为满足仿真的高精度和高实时性的要求, 引入计算速度动态调节, 即变步长。因此, 配电网信息物理系统仿真计算速度动态调节方法包括仿真步长综合优化目标函数设计和仿真步长自适应适应机制。

示例性的, 对于仿真步长综合优化目标函数设计, 最大仿真步长的求解算法流程图如图 18 所示, 图 18 为本发明实施例提供的一种最大仿真步长计算的可选的示意图。图 18 中 AC(Alternating Current) 表示交流, 图 18 中数字侧的微分方程 $\dot{y} = f_1(x, y)$ 表征如公式 (14) 所示。

$$\dot{y} = f_1(y, u, i) \quad (14)$$

设其步长为 h , 采用前向欧拉法做数值积分, 得到的 y_{n+1} 如公式 (15) 所示。

$$y_{n+1} = y_n + hf_1(y_n, u_n, i_n) \quad (15)$$

上述图 18 中数模接口及 HUT 的微分方程 $\dot{x} = f_2(x, y)$, 为一纯迟延系统描述如公式 (16) 所示。

$$i_n = i_{n-\tau/h} \quad (16)$$

在公式 (16) 中, τ 为延时。则系统总的方程 $z = f(x, y)$ 描述如公式 (17) 所示。

$$\begin{bmatrix} y_{n+1} \\ i_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_n \\ i_{n-\frac{\tau}{h}+1} \end{bmatrix} + h \begin{bmatrix} f_1(y_n, u_n, i_n) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

上述公式 (17) 可简写为如公式 (18)。

$$X_{n+1} = X_{n+1-k} + hf(y_n, u_n, i_n) \quad (18)$$

假定接口为纯迟延系统, 不考虑其误差, 由上式可得公式 (19) 所示。

$$\max \left\{ \frac{e(X)_{n+1}}{e(X)_n} \right\} = \max \left\{ \frac{y_{n+1} - y_{n+1}^*}{y_n - y_n^*} \right\} = 1 + h \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=x_n} \quad (19)$$

上述公式 (19) 中, e 表示积分误差。若要求数值稳定则需要满足公式 (20)。

$$\left| 1 + h \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=x_n} \right| < 1 \quad (20)$$

据上述公式 (20) 可得仿真步长的 h_1 。其截断误差如公式 (21) 所示。

$$e = h^2 \sum \frac{X_i''}{2!} \quad (21)$$

受限于仿真精度的要求, 例如仿真精度 $o(h^2) < \varepsilon$, 数值稳定性 $|1 + h * \partial f / \partial x| < 1$, 如公式 (22) 所示。

$$\left| h^2 \sum \frac{X_i''}{2!} \right| < \varepsilon \quad (22)$$

由上式可得仿真步长 h_2 。 h_1 和 h_2 的公共部分即为仿真步长的运行方位, 其上界 (即 $h_{1\max}$ 和 $h_{2\max}$ 二者最小值) 即为仿真步长的最大值 $h_{\max}$ 。

示例性的, 对于仿真步长自适应机制, 不同场景下的仿真步长自适应机制如图 19 所示, 图 19

为本发明实施例提供的一种仿真步长自适应机制的可选的示意图。图 19 中 t_0 表示仿真开始时刻（也可以称为仿真初刻）， t_1 表示故障发生时刻（也可以称为故障时刻）， t_2 表示故障切除时刻， t_{end} 表示仿真结束时刻。 t_0 至 t_1 这段时间是故障前稳态， t_1 至 t_2 这段时间是故障中， t_2 至 t_{end} 这段时间是故障后。在 t_0 至 t_1 这段时间内系统处于稳态，这时可以采用后向欧拉法，梯形法等运算量小，精度稍低的算法，采用较大的步长进行仿真，假设以所提的仿真步长目标函数求得的最大步长 h_{max} 为仿真步长，仿真到故障发生时刻前一点 t_k ，若采用最大步长 h_{max} 后越过故障发生时刻 t_1 ，则最大仿真步长更改为 $t_1 - t_k$ 。 t_2 、 t_{end} 时刻的处理方法也采用同样的处理方法。

在本发明实施例中，配电网信息物理系统故障仿真分析方法包括三个步骤：配电网信息物理系统故障仿真模型的构建、配电网信息物理系统故障仿真方法和配电网信息物理系统故障仿真算例分析，通过以上 S1031-S1033 实现对配电网信息物理系统故障仿真模型的构建，配电网信息物理系统故障仿真方法包括以上 S1034 中的仿真分解协调方法、多速率并行实时仿真方法和计算速度动态调节方法。接下来对配电网信息物理系统故障仿真算例分析进行介绍。

在一些实施例中，多速率并行实时仿真方法包括多速率仿真协调策略，计算速度动态调节方法是仿真步长动态调节方法；上述 S1034 还可以通过以下方式实现。根据预设物理系统分段开关中发生永久性故障的节点、预设物理系统故障发生时间和预设通信链路故障发生时间，基于多速率仿真协调策略和仿真步长动态调节方法，对包含各个元件的物理网络等效模型进行故障实时仿真，确定故障扩展节点；配电网的故障仿真结果包括故障扩展节点。

在本发明实施例中，以配电网信息物理系统故障仿真算例分析是信息物理系统并发故障仿真为例，当配电网物理层发生故障时，断路器开关会发生跳闸，负荷开关失压分闸，重合失败后，相关终端的过流信息会通过信息通信层上传到控制平台，控制平台对故障进行定位并下达控制指令完成非故障区域的重合闸。若上传过程中通信链路发生 DDOS 攻击，使得控制指令无法下达，会造成停电区域扩大。仿真模型如图 20 所示，图 20 为本发明实施例提供的一种配电网信息物理仿真算例分析的可选的示意图，图 20 示出了信息控制层、信息通信层和配电网物理层之间的交互。仿真过程如下。

示例性的，针对目标配电网信息物理系统，采用上述 S1021-S1023 所描述的方法，构建物理系统模型、通信网络模型和信息系统模型。针对目标配电网信息物理系统，设置物理系统分段开关 11-12 之间发生永久性故障，通信链路中发生 DDOS 攻击，导致服务器无法响应正常请求，造成通信网络堵塞故障。针对配电网物理系统中不同元件动态响应时间的差异，将其分为快/中/慢类型，并进行仿真任务解耦和网络解耦；基于快/中/慢多速率仿真协调策略和仿真步长动态调节方法，实现信息物理系统的实时仿真；设置物理系统故障发生时间和通信链路故障发生时间。在物理系统分段开关 11-12 之间发生永久性故障后，会造成断路器 5 保护动作跳闸，重合闸失败后通过通信层上传过流信息至控制中心，此时由于通信链路中发生 DDOS 攻击，导致服务器无法响应正常请求，控制指令无法下达，断路器 5 及非故障区域的负荷开关 6-10、13-16 以及联络开关 3-13 没有正常合闸，停电区域由节点 11-12 扩散至节点 15-16（即故障扩展节点）。

在一些实施例中，上述图 1 中 S104 还可以包括 S1041-S1047。

S1041、根据深度搜索法分别对配电网的供电路径和通信网络进行搜索，确定最小供电路径和最短通信链路。

S1042、采用蒙特卡洛方法，根据最小供电路径和最短通信链路，在多个元件中随机抽取 N 个元件，计算 N 个元件的正常工作时间和故障修复时间。

S1043、根据路由表和关联关系，查找每个负荷节点直接影响的目标元件。

S1044、重新对目标元件分别抽取新随机数，并根据新随机数分别计算目标元件的修正工作时间。

S1045、将目标元件的修正工作时间、正常工作时间和故障修复时间之和作为目标元件的新正常工作时间；目标元件的新正常工作时间用于下一次的工作时间模拟过程。

S1046、持续进行工作时间模拟，直至任一元件的正常工作时间达到预设仿真年限，得到各个元件的目标正常工作时间和目标故障修复时间。

S1047、根据各个元件的目标正常工作时间和目标故障修复时间，计算负荷节点评价结果和可靠性评价结果；可靠性仿真结果包括负荷节点评价结果和可靠性评价结果。

在本发明实施例中，基于配电网信息物理交互特性，构建了配电网信息物理系统可靠性评估体系并提出了可靠性仿真计算方法，为配电网可靠性提升提供了有力的理论支撑与决策辅助，维护了配电网的稳定可靠运行，提高了配电网信息物理系统及其仿真平台的适应性。

在一些实施例 5 中, 元件包括: 物理侧元件和信息侧元件, 目标元件包括: 目标物理侧元件和目标信息侧元件; 上述 S1047 还可以通过以下方式实现。根据各个物理侧元件的目标正常工作时间和目标故障修复时间, 以及各个信息侧元件的目标正常工作时间和目标故障修复时间, 计算负荷节点评价结果; 根据各个物理侧元件的目标正常工作时间和目标故障修复时间, 计算物理侧可靠性评价结果; 根据各个信息侧元件的目标正常工作时间和目标故障修复时间, 计算信息侧可靠性评价结果; 可靠性评价结果包括物理侧可靠性评价结果和信息侧可靠性评价结果。

在本发明实施例中, 元件包括: 物理侧元件和信息侧元件, 重新对目标物理侧元件和目标信息侧元件分别抽取新随机数, 并根据新随机数分别计算目标物理侧元件的修正工作时间, 以及目标信息侧元件的修正工作时间; 将目标物理侧元件的修正工作时间、正常工作时间和故障修复时间之和作为目标物理侧元件的新正常工作时间; 将目标信息侧元件的修正工作时间、正常工作时间和故障修复时间之和作为目标信息侧元件的新正常工作时间; 目标物理侧元件的新正常工作时间和目标信息侧元件的新正常工作时间用于下一轮的模拟过程, 持续进行工作时间模拟, 直至信息侧或物理侧的任一元件的正常工作时间达到预设仿真年限, 得到各个物理侧元件的目标正常工作时间和目标故障修复时间, 以及各个信息侧元件的目标正常工作时间和目标故障修复时间。

在本发明实施例中, 根据物理侧元件的故障率、物理侧元件的权重、信息侧元件的故障率、信息侧元件的权重, 确定负荷节点综合故障率; 根据负荷节点的综合故障率, 将 N 个物理侧元件对应的 N 个随机数转化为 N 个物理侧元件的正常工作时间。

本发明实施例提供了一种考虑信息物理交互影响的可靠性计算方法, 在配电网信息物理系统中, 物理和信息子系统间的相互作用较为复杂, 因此, 对于整个配电网信息物理系统的可靠性分析需要考虑信息系统和物理系统间的相互作用与影响。本发明实施例采用主观赋权法表征信息系统可靠性对物理系统可靠性的影响, 进而获得考虑信息物理交互影响的可靠性计算方法。本发明实施例提供的基于蒙特卡洛方法的配电网信息物理系统可靠性分析流程如图 21 所示, 该可靠性分析流程包括 S41-S48。

S41、初始参数输入 (即输入物理系统参数与信息系统参数)。

在初始化参数时, 还初始化各个物理侧元件和通信侧元件的故障率、修复时间及系统修复时间。

S42、采用深度搜索法对配电网的供电路径进行搜索, 并确定最小供电路径与最短通信链路 (对应于上述 S1041, 即根据深度搜索法分别对配电网的供电路径和通信网络进行搜索, 确定最小供电路径和最短通信链路)。

采用深度搜索法对配电网的供电路径进行搜索, 确定最小供电路径; 采用深度搜索法对配电网通信网络进行搜索, 确定最短通信链路。

S43、在物理侧, 确定需要进行故障模拟的元件 (n 个), 对于每个元件, 在相应节点的物理侧, 产生 0-1 之间的随机数; 根据元件的综合故障率将其转化为物理侧元件的正常工作时间 TTF_p , 时钟 $T=0$ (对应于上述 S1042, 即采用蒙特卡洛方法, 根据最小供电路径和最短通信链路, 在多个元件中随机抽取 N 个元件, 计算 N 个元件的正常工作时间和故障修复时间)。

根据蒙特卡洛方法, 抽取 N 个随机数, 并依据如下公式 (23) 和公式 (24) 计算各元件正常工作时间 TTF 和故障修复时间 TTR , 并赋值时钟 $T=0$ 。考虑信息侧与物理侧故障间的相互影响, 采用主观赋值法依据不同节点信息侧和物理侧影响程度的相对大小, 确定该负荷节点的综合故障率, 如公式 (25) 所示。

$$TTF = -1/[\lambda \ln(n)] \quad (23)$$

$$TTR = -1/[\mu \ln(n)] \quad (24)$$

$$\lambda_{zh} = \alpha_1 \cdot \lambda_p + \alpha_2 \cdot \lambda_c \quad (25)$$

上述公式 (25) 中, λ_{zh} , λ_p , λ_c 分别代表节点综合故障率、物理侧节点故障率、通信节点故障率, α_1 和 α_2 分别为物理侧和对应信息侧的影响权重, 可根据不同节点的实际情况进行确定。

S44、在相应节点的信息侧, 产生 0-1 之间的随机数; 根据元件的综合故障率将其转化为信息侧元件的正常工作时间 TTF_c 。

针对信息层, 采用与物理层相同的蒙特卡洛方法原理, 进行通信节点元件的正常工作时间 TTF 和故障修复时间 TTR 。

S45、认为该元件故障, 根据路由表、关联关系, 找出其直接影响的物理侧负荷点和直接影响的通信节点, 记录每个节点的运行情况, 完成一次模拟过程 (对应于上述 S1043, 根据路由表和关联关系, 查找每个负荷节点直接影响的的目标元件)。

S46、对该节点所对应的物理侧元件和信息侧元件分别产生一个新的随机数，求取相应的 TTF' (对应于上述 S1044，即重新对目标元件分别抽取新随机数，并根据新随机数分别计算目标元件的修正工作时间)，并将 TTF+TTR+TTF' 作为该节点新的正常工作时间 TTF_p 和 TTF_c (对应于上述 S1045，即将目标元件的修正工作时间、正常工作时间之和作为目标元件的新正常工作时间；

5 目标元件的新正常工作时间用于下一次的工作时间模拟过程)。

重新对该元件所处节点的物理侧元件和信息侧元件分别抽取新随机数，求取相应的 TTF'，并将 TTF+TTR+TTF' 作为该节点物理侧元件和信息侧元件新的正常工作时间 TTF；

S47、判断模拟时间是否大于仿真年限，当信息侧或物理侧元件任一元件 TTF 达到仿真年限后，循环结束，继续执行 S48 (对应于上述 S1046，即持续进行工作时间模拟，直至任一元件的正常工作时间达到预设仿真年限，得到各个元件的目标正常工作时间和目标故障修复时间)。

做出判断，当模拟时间未达到仿真年限时，重复步骤 S43-S47。

S48、计算负荷点指标及系统物理侧可靠性指标，程序结束 (对应于上述 S1047，即根据各个元件的目标正常工作时间和目标故障修复时间，计算负荷节点评价结果和可靠性评价结果；可靠性仿真结果包括负荷节点评价结果和可靠性评价结果)。

15 在一些实施例中，上述可靠性评估指标包括物理侧可靠性评估指标；该配电网仿真方法还包括以下步骤：基于仿真平台架构，根据获取的各个元件的故障率和各个设备的故障率，利用预先构建的不同形式的可靠性评估模型和物理侧可靠性评估指标，进行配电网信息物理系统的物理侧可靠性评估，确定物理侧可靠性仿真结果；可靠性仿真结果包括物理侧可靠性仿真结果；其中，不同形式的可靠性评估模型包括多个组件串联构成的串联式单元、多个组件并联构成的并联式单元，以及多个组件并联后与表决器串联构成的表决式单元。

20 在本发明实施例中，在进行配电网信息物理系统物理侧可靠性评估之前，需要建立元件、设备的可靠性评估模型，并获得各个元件、设备的故障率，配电网常用元件、设备的可靠度与故障率计算模型可以包括串联式单元、并联式单元和表决式单元。以下采用框图法对元件及设备的可靠度与故障率计算模型的构建进行说明。

25 示例性的，对于串联式单元的建模，串联式单元的可靠性框图如图 22a 所示，单元内所有组件全部正常工作时，即 $r_1, r_2 \dots r_i$ 组件全部正常工作，单元才能正常工作，其可靠度计算如公式 (26) 所示。

$$R_s = r_1 \cdot r_2 \cdot \dots \cdot r_n = \prod_{i=1}^n r_i \quad (26)$$

公式 (26) 中 R_s 表示串联式单元的可靠度， r_i 表示单元内第 i 个组件的可靠度。

30 示例性的，对于并联式单元的建模，并联式单元的可靠性框图如图 22b 所示，单元内只要存在正常工作的组件，即 $r_1, r_2 \dots r_i$ 中任一个组件，单元即能正常工作，其可靠度计算如式 (27) 所示。

$$R_p = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - r_i) \quad (27)$$

公式 (27) 中 R_p 表示并联式单元的可靠度。

35 示例性的，对于表决式单元的建模，由 n 个组件 $r_1, r_2 \dots r_i, i=n$ 组成的并联单元，其中有任何 r 个组件 r/n 正常工作时，单元可正常工作，表决式单元的可靠性框图如图 22c 所示，其可靠度计算如公式 (28) 所示。

$$R_L = \sum_{i=0}^{k=r} \binom{n}{i} R_i^{n-i}(t) F_i^i(t) \quad (28)$$

公式 (28) 中 R_L 表示表决式单元的可靠度， R_i 和 F_i 分别为第 i 个组件的可靠度和不可靠度。

40 在一些实施例中，上述物理侧可靠性评估指标包括持续停电指标、瞬时停电指标，以及与负荷相关的指标；其中，持续停电指标包括以下至少一项：系统平均停电频率、系统平均停电时间、用户平均停电持续时间、用户总平均停电时间、用户平均停电频率、平均供电可用率和用户多次供电指标；与负荷相关的停电指标包括以下至少一项：平均系统停电频率和平均系统停电持续时间；瞬时停电指标包括：平均瞬时停电频率。

45 在本发明实施例中，当配电网信息物理系统可靠性仿真时，还需要构建配电网信息物理系统物理侧可靠性评估指标，配电网物理系统可靠性指标分为三大类，持续停电指标、瞬时停电指标、与负荷相关的指标，各类指标定义如下所示。

在本发明实施例中,持续停电指标包括系统平均停电频率、系统平均停电时间、用户平均停电持续时间、用户总平均停电时间、用户平均停电频率、平均供电可用率和用户多次供电指标,以下分别进行说明。

系统平均停电频率(SAIFI),单位是次/(户·a),如公式(29)所示。

$$SAIFI = \frac{\sum N_c}{N_{total}} \quad (29)$$

上述公式(29)中, N_c 为每次停电用户数, N_{total} 为用户总数。

系统平均停电时间(SAIDI),单位是min/(户·a),如公式(30)所示。

$$SAIDI = \frac{\sum T_c}{N_{total}} \quad (30)$$

上述公式(30)中, T_c 为用户停电时间。

10 用户平均停电持续时间(CAIDI),单位是min/次,如公式(31)所示。

$$CAIDI = \frac{\sum T_c}{\sum N_c} \quad (31)$$

用户总平均停电时间(CTAIDI),单位是min/(户·a),如公式(32)所示。

$$CTAIDI = \frac{\sum T_c}{N_{C,total}} \quad (32)$$

上述公式(32)中, $N_{C,total}$ 为停电影响的用户数。

15 用户平均停电频率(CAIFI),单位是次/(户·a),如公式(33)所示。

$$CAIFI = \frac{\sum N_c}{N_{C,total}} \quad (33)$$

平均供电可用率(ASAI),如公式(34)所示。

$$ASAI = \frac{h_{available}}{h_{demand}} \times 100\% \quad (34)$$

上述公式(34)中, $h_{available}$ 和 h_{demand} 分别表示供电可用小时数与用户供电需求小时数。

20 用户多次供电指标(CEMI_n),如公式(35)所示。

$$CEMI_n = \frac{N_{outagen}}{N_{total}} \times 100\% \quad (35)$$

在本发明实施例中,与负荷相关的停电指标包括平均系统停电频率(ASIFI)和平均系统停电持续时间(ASIDI),以下分别进行说明。

平均系统停电频率(ASIFI)如公式(36)所示。

$$ASIFI = \frac{\sum L_{outage}}{L_{total}} \quad (36)$$

其中, L_{outage} 和 L_{total} 分别表示每次停电损失负荷和供电负荷总量。

平均系统停电持续时间(ASIDI),单位是min,如公式(37)所示。

$$ASIDI = \frac{\sum L_{outage} \times T_c}{L_{total}} \quad (37)$$

30 在本发明实施例中,瞬时停电指标包括平均瞬时停电频率(MAIFI),单位是次/(户·a),如公式(38)所示。

$$MAIFI = \frac{\sum O_s \times N_{outages}}{N_{total}} \quad (38)$$

上述公式(38)中 O_s 和 $N_{outages}$ 分别表示每次停电的操作次数和每次瞬时停电用户数。

在本发明实施例中,当使用上述配电网物理系统可靠性指标进行可靠性判定时,可较好的反映

配电网历年运行指标的变化趋势。

在一些实施例中,上述可靠性评估指标包括信息侧可靠性评估指标,信息侧可靠性评估指标包括:网络连通度可靠性和网络性能可靠性;其中,网络连通度可靠性包括以下至少一项:连通度、粘聚度、混合连通系数、网络基本可靠度、端对端可靠度和全端可靠度;网络性能可靠性包括以下至少一项:平均故障间隔时间和平均故障修复时间。

在本发明实施例中,当配电网信息物理系统可靠性仿真时,还需要构建配电网信息物理系统信息侧可靠性评价指标,配电网信息系统可靠性指标分为两个部分,网络连通度可靠性和网络性能可靠性。各类指标定义如下所示。

在本发明实施例中,网络连通度可靠性包括连通度、粘聚度、混合连通系数、网络基本可靠度、端对端可靠度和全端可靠度,以下分别进行说明。

连通度如公式(39)所示。

$$T = \min_{i,j}(CH_{ij}) \quad (39)$$

上述公式(39)中, T 表示节点 i 与节点 j 之间的连通度, CH_{ij} 为断开联通网络中节点 i 与节点 j 之间所有路径必须去掉的路径数。

粘聚度如公式(40)所示。

$$S = \min_{i,j}(CN_{ij}) \quad (40)$$

上述公式(40)中, S 表示节点 i 与节点 j 之间的粘聚度, CN_{ij} 为断开联通网络中节点 i 与节点 j 之间所有路径必须去掉的节点数。

混合连通系数如公式(41)所示。

$$C = \min(M) \quad (41)$$

上述公式(41)中, M 表示使得信息网络分为几个子网时所需断开及去掉路径数与节点数。

网络基本可靠度如公式(42)所示。

$$R_0(t) = \prod_{i=1}^v R_{vi}(t) \prod_{j=1}^e R_{ej}(t) \quad (42)$$

上述公式(42)中,基本可靠度反映对象(如通信网络、网络部件、网络设备)无故障的概率,其中 $R_{vi}(t)$ 表示第 i 条通信链路通畅无故障的概率, $R_{ej}(t)$ 表示 j 个网络部件或设备无故障的概率。

端对端可靠度如公式(43)所示。

$$R_G = \sum_{i=0}^e \sum_{j=0}^v F_{i,j} \rho_v^j (1-\rho_v)^{v-j} \rho_e^i (1-\rho_e)^{e-i} \quad (43)$$

上述公式(43)表示网络 G 中规定的两个节点之间至少存在一条路径的概率网络性能可靠性。全端可靠度如公式(44)所示。

$$R_e l_A(G) = \sum_{i=0}^e N_i R(t) (1-R(t))^{e-i} \quad (44)$$

表示网络中所有节点之间至少存在一条路径的概率。

由上述网络基本可靠度、端对端可靠度和全端可靠度的定义可知,对于某一负荷节点,其对应信息侧的故障率为 λ_C 如公式(45)所示。

$$\lambda_C = 1 - R_G \quad (45)$$

在本发明实施例中,网络性能可靠性包括平均故障间隔时间和平均故障修复时间,以下分别进行说明。

平均故障间隔时间如公式(46)所示。

$$MTBF = \frac{T}{d} = \frac{1}{\lambda} \quad (46)$$

上述公式(46)中平均故障间隔时间可表示有效期内故障发生的频繁程度,其中 T 表示有效监控期故障持续总时间, d 表示单词故障平均持续时间, λ 表示故障发生概率。

平均故障修复时间如公式(47)所示。

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^d t_i \alpha_i}{d} \quad (47)$$

上述公式(47)中平均修复时间可用以表征故障修复的平均时间。

为实现本发明实施例的配电网仿真方法,本发明实施例还提供一种配电网仿真系统,如图23所示,图23为本发明实施例提供的一种配电网仿真系统的可选的结构示意图,该配电网仿真系统230包括:平台搭建部分2301,被配置为根据配电网中信息系统与物理系统之间的模型差异性、交互影响,以及多场景仿真验证的规模和精度,进行多层次、多尺度的平台架构建模,得到仿真平台架构;融合部分2302,被配置为在仿真平台架构上,根据配电网中物理系统与信息系统之间的耦合特性,对时变信息、非确定条件下的信息物理仿真系统进行融合建模,得到配电网信息物理系统;故障仿真部分2303,被配置为基于仿真平台架构,在物理系统、通信网络及信息系统的并发故障场景下,对配电网信息物理系统进行实时仿真,确定配电网的故障仿真结果;故障仿真结果用于向配电网信息物理系统的故障隔离决策和故障恢复决策提供支持;可靠性仿真部分2304,被配置为基于仿真平台架构,利用可靠性评估指标对配电网信息物理系统进行可靠性仿真评估,确定配电网的可靠性仿真结果。

在一些实施例中,融合部分2302,还被配置为基于配电网动态等值模型和支撑不同模态配电网运行的仿真模型库,构建物理系统模型;基于支持多种典型协议的跨应用、跨节点的数据流模型库,构建通信网络模型;基于通信网络模型,对多源信息进行预处理,结合信息网络安全模型,构建信息系统模型;基于关联矩阵、物理系统模型、通信网络模型和信息系统模型,进行系统融合建模,得到融合系统;基于设备的有限状态机和系统的有限状态机,分别对融合系统中设备的有限状态机模型和系统的有限状态机模型进行构建,得到配电网信息物理系统。

在一些实施例中,融合部分2302,还被配置为基于有限状态机的配电混合网信息物理融合建模方法和物理侧交互元件的多分辨率多层次柔性模型构建方法,形成支撑不同模态配电网运行的仿真模型库;根据用于支撑物理信息系统交互的通信网络物理层模型和数据链路层模型、通信应用层模型、关键事件流和信息流过程模型的构建方法,形成支持多种典型协议的跨应用、跨节点的数据流模型库。

在一些实施例中,仿真平台架构包括模型层、数据层、算法层、接口层和业务层;接口层用于连接配电网的物理侧与信息侧;

融合部分2302,还被配置为在模型层中,针对配电网的物理侧,采用平均化方法与动态相量法进行模型构建,得到配电网动态等值模型;针对配电网的信息侧,采用脚本方法,对关键事件流和信息流进行模型构建,得到关键事件流和信息流过程模型;并构建通信网络物理层模型、数据链路层模型、通信应用层模型和信息网络安全模型;在数据层中,对模型构建过程和仿真过程中的数据进行数据采集、数据处理和数据存储;业务层包括仿真功能模块和应用场景验证模块,仿真功能模块用于支持配电网信息物理系统的暂态仿真功能、配电网信息物理系统的稳态仿真功能、通信网络及通信网络故障仿真功能;场景验证模块用于支持配电网信息物理系统的并发故障场景验证、配电网信息物理系统的可靠性分析仿真、配电网的信息侧攻击与故障场景验证;

故障仿真部分2303,还被配置为在算法层中,采用仿真网络分解协调技术、多速率并行实时仿真方法和计算速度动态调节方法,在物理系统、通信网络及信息系统的并发故障场景下,对配电网物理节点进行实时仿真,确定配电网的故障仿真结果。

在一些实施例中,故障仿真部分2303,还被配置为根据不同元件动态响应时间或响应速度,对元件进行分类,得到各个元件的元件类型;其中,元件类型包括快类型、中间类型和慢类型,中间类型对应的仿真步长大于快类型对应的仿真步长,且小于或等于慢类型对应的仿真步长;对配电网中分类后的元件进行建模;对包含各个元件的配电网信息物理系统中的物理网络进行动态解耦,并建立等效模型;采用仿真分解协调方法、多速率并行实时仿真方法和计算速度动态调节方法,对包含各个元件的物理网络等效模型进行故障实时仿真,确定配电网的故障仿真结果。

在一些实施例中,多速率并行实时仿真方法包括多速率仿真协调策略,计算速度动态调节方法是仿真步长动态调节方法;

故障仿真部分2303,还被配置为根据预设物理系统分段开关中发生永久性故障的节点、预设物理系统故障发生时间和预设通信链路故障发生时间,基于多速率仿真协调策略和仿真步长动态调节方法,对包含各个元件的物理网络等效模型进行故障实时仿真,确定故障扩展节点;配电网的故障仿真结果包括故障扩展节点。

在一些实施例中,故障仿真部分2303,还被配置为获取加载数据和中央处理器核心数量;根据加载数据和中央处理器核心数量进行暂态仿真,利用遗传算法,对计算线路的中央处理器数量和计算各个元件的中央处理器数量,进行分配,得到分配结果;分配结果包括各个中央处理器对应的节

点类型、数量和所在的线路；根据分配结果，构建仿真任务分解模型；采用节点分裂法，对各个元件的配电网信息物理系统中物理网络对应的仿真任务分解模型，进行与各个元件的元件类型对应的动态解耦，得到解耦后的模型；根据解耦后的模型，构建各个元件的网络间的等效模型和元件与网络之间的等效模型；等效模型包括网络间的等效模型和元件与网络之间的等效模型。

5 在一些实施例 2304 中，还被配置为根据深度搜索法分别对配电网的供电路径和通信网络进行搜索，确定最小供电路径和最短通信链路；采用蒙特卡洛方法，根据最小供电路径和最短通信链路，在多个元件中随机抽取 N 个元件，计算 N 个元件的正常工作时间和故障修复时间；根据路由表和关联关系，查找每个负荷节点直接影响的目标元件；重新对目标元件分别抽取新随机数，并根据新随机数分别计算目标元件的修正工作时间；将目标元件的修正工作时间、正常工作时间和故障修复时间之和作为目标元件的新正常工作时间；目标元件的新正常工作时间用于下一次的工作时间模拟过程；持续进行工作时间模拟，直至任一元件的正常工作时间达到预设仿真年限，得到各个元件的目标正常工作时间和目标故障修复时间；根据各个元件的目标正常工作时间和目标故障修复时间，计算负荷节点评价结果和可靠性评价结果；可靠性仿真结果包括负荷节点评价结果和可靠性评价结果。

15 在一些实施例 2304 中，元件包括：物理侧元件和信息侧元件，目标元件包括：目标物理侧元件和目标信息侧元件；

可靠性仿真部分 2304，还被配置为根据各个物理侧元件的目标正常工作时间和目标故障修复时间，以及各个信息侧元件的目标正常工作时间和目标故障修复时间，计算负荷节点评价结果；根据各个物理侧元件的目标正常工作时间和目标故障修复时间，计算物理侧可靠性评价结果；根据各个信息侧元件的目标正常工作时间和目标故障修复时间，计算信息侧可靠性评价结果；可靠性评价结果包括物理侧可靠性评价结果和信息侧可靠性评价结果。

20 在一些实施例 2304 中，可靠性评估指标包括物理侧可靠性评估指标；

可靠性仿真部分 2304，还被配置为基于仿真平台架构，根据获取的各个元件的故障率和各个设备的故障率，利用预先构建的不同形式的可靠性评估模型和物理侧可靠性评估指标，进行配电网信息物理系统的物理侧可靠性评估，确定物理侧可靠性仿真结果；可靠性仿真结果包括物理侧可靠性仿真结果；其中，不同形式的可靠性评估模型包括多个组件串联构成的串联式单元、多个组件并联构成的并联式单元，以及多个组件并联后与表决器串联构成的表决式单元。

25 在一些实施例 2304 中，物理侧可靠性评估指标包括持续停电指标、瞬时停电指标，以及与负荷相关的指标；其中，持续停电指标包括以下至少一项：系统平均停电频率、系统平均停电时间、用户平均停电持续时间、用户总平均停电时间、用户平均停电频率、平均供电可用率和用户多次供电指标；与负荷相关的停电指标包括以下至少一项：平均系统停电频率和平均系统停电持续时间；瞬时停电指标包括：平均瞬时停电频率。

30 在一些实施例 2304 中，可靠性评估指标包括信息侧可靠性评估指标，信息侧可靠性评估指标包括：网络连通度可靠性和网络性能可靠性；其中，网络连通度可靠性包括以下至少一项：连通度、粘聚度、混合连通系数、网络基本可靠度、端对端可靠度和全端可靠度；网络性能可靠性包括以下至少一项：平均故障间隔时间和平均故障修复时间。

35 需要说明的是，上述实施例提供的配电网仿真系统在进行配电网仿真时，仅以上述各程序部分的划分进行举例说明，实际应用中，可以根据需要而将上述处理分配由不同的程序部分完成，即将系统的内部结构划分成不同的程序部分，以完成以上描述的全部或者部分处理。另外，上述实施例提供的配电网仿真系统与配电网仿真方法实施例属于同一构思，其具体实现过程及有益效果详见方法实施例，这里不再赘述。对于本系统实施例中未披露的技术细节，请参照本发明方法实施例的描述而理解。

40 在本发明实施例中，图 24 为本发明实施例提出的配电网仿真设备组成结构示意图，如图 24 所示，本发明实施例提出的配电网仿真设备 240 包括处理器 2401、存储可执行计算机程序的存储器 2402、处理器 2401，被配置为执行存储器 2402 中存储的可执行计算机程序时，实现本发明实施例提供的配电网仿真方法。在一些实施例中，配电网仿真设备 240 还可以包括通信接口 2403，以及用于连接处理器 2401、存储器 2402 和通信接口 2403 的总线 2404。

45 在本发明实施例中，上述处理器 2401 可以为特定用途集成电路（Application Specific Integrated Circuit, ASIC）、数字信号处理器（Digital Signal Processor, DSP）、数字信号处理装置（Digital Signal Processing Device, DSPD）、可编程逻辑装置（Programmable Logic Device, PLD）、现场可编程门阵列（Field Programmable Gate Array, FPGA）、中央处理器（Central Processing Unit, CPU）、控制

器、微控制器、微处理器中的至少一种。可以理解地，对于不同的设备，用于实现上述处理器功能的电子器件还可以为其它，本发明实施例不作具体限定。

在本发明实施例中，总线 2404 用于连接通信接口 2403、处理器 2401 以及存储器 2402，实现这些器件之间的相互通信。

5 存储器 2402 用于存储可执行计算机程序和数据，该可执行计算机程序包括计算机操作指令，存储器 2402 可能包含高速 RAM 存储器，也可能还包括非易失性存储器，例如，至少两个磁盘存储器。在实际应用中，上述存储器 2402 可以是易失性存储器（volatile memory），例如随机存取存储器（Random-Access Memory，RAM）；或者非易失性存储器（non-volatile memory），例如只读存储器（Read-Only Memory，ROM），快闪存储器（flash memory），硬盘（Hard Disk Drive，HDD）或固态硬盘（Solid-State Drive，SSD）；或者上述种类的存储器的组合，并向处理器 2401 提供可执行计算机程序和数据。

另外，在本实施例中的各功能模块可以集成在一个处理单元中，也可以是各个单元单独物理存在，也可以两个或两个以上单元集成在一个单元中。上述集成的单元既可以采用硬件的形式实现，也可以采用软件功能模块的形式实现。

15 集成的单元如果以软件功能模块的形式实现并非作为独立的产品进行销售或使用，可以存储在一个计算机可读存储介质中，基于这样的理解，本实施例的技术方案本质上或者说对现有技术做出贡献的部分或者该技术方案的全部或部分可以以软件产品的形式体现出来，该计算机软件产品存储在一个存储介质中，包括若干指令用以使得一台计算机设备（可以是个人计算机，服务器，或者网络设备等）或 processor（处理器）执行本实施例方法的全部或部分步骤。而前述的存储介质包括：U 盘、移动硬盘、只读存储器（Read Only Memory，ROM）、随机存取存储器（Random Access Memory，RAM）、磁碟或者光盘等各种可以存储程序代码的介质。

20 本发明实施例提供一种计算机可读存储介质，存储有计算机程序，被配置为被处理器执行时实现如上任一实施例所述的配电网仿真方法。

示例性的，本实施例中的一种配电网仿真方法对应的程序指令可以被存储在光盘，硬盘，U 盘等存储介质上，当存储介质中的与一种配电网仿真方法对应的程序指令被一电子设备读取或被执行时，可以实现如上述任一实施例所述的配电网仿真方法。

本领域内的技术人员应明白，本发明实施例可提供为方法、系统、或计算机程序产品。因此，本发明可采用硬件实施例、软件实施例、或结合软件和硬件方面的实施例的形式。而且，本发明可采用在一个或多个其中包含有计算机可用程序代码的计算机可用存储介质（包括但不限于磁盘存储器和光学存储器等）上实施的计算机程序产品的形式。

30 本发明是参照根据本发明实施例的方法、设备（系统）、和计算机程序产品的实现流程示意图和/或方框图来描述的。应理解可由计算机程序指令实现流程示意图和/或方框图中的每一流程和/或方框、以及实现流程示意图和/或方框图中的流程和/或方框的结合。可提供这些计算机程序指令到通用计算机、专用计算机、嵌入式处理机或其他可编程数据处理设备的处理器以产生一个机器，使得通过计算机或其他可编程数据处理设备的处理器执行的指令产生用于实现在实现流程示意图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能的装置。

35 这些计算机程序指令也可存储在能引导计算机或其他可编程数据处理设备以特定方式工作的计算机可读存储器中，使得存储在该计算机可读存储器中的指令产生包括指令装置的制造品，该指令装置实现在实现流程示意图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能。

40 这些计算机程序指令也可装载到计算机或其他可编程数据处理设备上，使得在计算机或其他可编程设备上执行一系列操作步骤以产生计算机实现的处理，从而在计算机或其他可编程设备上执行的指令提供用于实现在实现流程示意图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能的步骤。

以上所述，仅为本发明的较佳实施例而已，并非用于限定本发明的保护范围。

工业实用性

5 本发明实施例公开一种配电网仿真方法、系统、设备和计算机可读存储介质。该方法包括：根据配电网中信息系统与物理系统之间的模型差异性、交互影响，及多场景仿真验证的规模和精度，进行多层级、多尺度的平台架构建模，得到仿真平台架构；在仿真平台架构上，根据配电网中物理系统与信息系统之间的耦合特性，对时变信息、非确定条件下的信息物理仿真系统进行融合建模，得到配电网信息物理系统；基于仿真平台架构，在物理系统、通信网络及信息系统的并发故障场景下，对配电网信息物理系统进行实时仿真，确定配电网的故障仿真结果；基于仿真平台架构，利用可靠性评估指标对配电网信息物理系统进行可靠性仿真评估，确定配电网的可靠性仿真结果。

权利要求书

1、一种配电网仿真方法，所述方法包括：

根据配电网中信息系统与物理系统之间的模型差异性、交互影响，以及多场景仿真验证的规模和精度，进行多层次、多尺度的平台架构建模，得到仿真平台架构；

在所述仿真平台架构上，根据所述配电网中所述物理系统与所述信息系统之间的耦合特性，对时变信息、非确定条件下的信息物理仿真系统进行融合建模，得到配电网信息物理系统；

基于所述仿真平台架构，在所述物理系统、通信网络及所述信息系统的并发故障场景下，对所述配电网信息物理系统进行实时仿真，确定所述配电网的故障仿真结果；所述故障仿真结果用于向所述配电网信息物理系统的故障隔离决策和故障恢复决策提供支持；

基于所述仿真平台架构，利用可靠性评估指标对所述配电网信息物理系统进行可靠性仿真评估，确定所述配电网的可靠性仿真结果。

2、根据权利要求1所述的方法，其中，所述根据所述配电网中所述物理系统与所述信息系统之间的耦合特性，对时变信息、非确定条件下的信息物理仿真系统进行融合建模，得到配电网信息物理系统，包括：

基于配电网动态等值模型和支撑不同模态配电网运行的仿真模型库，构建物理系统模型；

基于支持多种典型协议的跨应用、跨节点的数据流模型库，构建通信网络模型；

基于所述通信网络模型，对多源信息进行预处理，结合信息网络安全模型，构建信息系统模型；

基于关联矩阵、所述物理系统模型、所述通信网络模型和所述信息系统模型，进行系统融合建模，得到融合系统；

基于设备的有限状态机和系统的有限状态机，分别对所述融合系统中设备的有限状态机模型和系统的有限状态机模型进行构建，得到所述配电网信息物理系统。

3、根据权利要求2所述的方法，其中，所述方法还包括：

基于有限状态机的配电混合网信息物理融合建模方法和物理侧交互元件的多分辨率多层次柔性模型构建方法，形成所述支撑不同模态配电网运行的仿真模型库；

根据用于支撑物理信息系统交互的通信网络物理层模型和数据链路层模型、通信应用层模型、关键事件流和信息流过程模型的构建方法，形成所述支持多种典型协议的跨应用、跨节点的数据流模型库。

4、根据权利要求2或3所述的方法，其中，所述仿真平台架构包括模型层、数据层、算法层、接口层和业务层；所述接口层用于连接所述配电网的物理侧与信息侧；

所述方法还包括：

在所述模型层中，针对所述配电网的物理侧，采用平均化方法与动态相量法进行模型构建，得到所述配电网动态等值模型；针对所述配电网的信息侧，采用脚本方法，对关键事件流和信息流进行模型构建，得到所述关键事件流和信息流过程模型；并构建所述通信网络物理层模型、数据链路层模型、通信应用层模型和所述信息网络安全模型；

在所述数据层中，对模型构建过程和仿真过程中的数据进行数据采集、数据处理和数据存储；

所述业务层包括仿真功能模块和应用场景验证模块，所述仿真功能模块用于支持所述配电网信息物理系统的暂态仿真功能、所述配电网信息物理系统的稳态仿真功能、所述通信网络及通信网络故障仿真功能；所述场景验证模块用于支持所述配电网信息物理系统的并发故障场景验证、所述配电网信息物理系统的可靠性分析仿真、所述配电网的信息侧攻击与故障场景验证；

在所述物理系统、通信网络及所述信息系统的并发故障场景下，对所述配电网信息物理系统进行实时仿真，确定所述配电网的故障仿真结果，包括：

在所述算法层中，采用仿真网络分解协调技术、多速率并行实时仿真方法和计算速度动态调节方法，在所述物理系统、所述通信网络及所述信息系统的并发故障场景下，对配电网物理节点进行实时仿真，确定所述配电网的故障仿真结果。

5、根据权利要求1-3任一项所述的方法，其中，所述对所述配电网信息物理系统进行实时仿真，确定所述配电网的故障仿真结果，包括：

根据不同元件动态响应时间或响应速度，对元件进行分类，得到各个元件的元件类型；其中，所述元件类型包括快类型、中间类型和慢类型，所述中间类型对应的仿真步长大于所述快类型对应

的仿真步长,且小于或等于所述慢类型对应的仿真步长;

对所述配电网中分类后的元件进行建模;

对包含所述各个元件的配电网信息物理系统中的物理网络进行动态解耦,并建立等效模型;

5 采用仿真分解协调方法、多速率并行实时仿真方法和计算速度动态调节方法,对包含所述各个元件的物理网络等效模型进行故障实时仿真,确定所述配电网的故障仿真结果。

6、根据权利要求5所述的方法,其中,所述多速率并行实时仿真方法包括多速率仿真协调策略,所述计算速度动态调节方法是仿真步长动态调节方法;

所述采用仿真分解协调方法、多速率并行实时仿真方法和计算速度动态调节方法,对包含所述各个元件的物理网络等效模型进行故障实时仿真,确定所述配电网的故障仿真结果,包括:

10 根据预设物理系统分段开关中发生永久性故障的节点、预设物理系统故障发生时间和预设通信链路故障发生时间,基于所述多速率仿真协调策略和所述仿真步长动态调节方法,对包含所述各个元件的物理网络等效模型进行故障实时仿真,确定故障扩展节点;所述配电网的故障仿真结果包括所述故障扩展节点。

15 7、根据权利要求5所述的方法,其中,所述对包含所述各个元件的配电网信息物理系统中的物理网络,进行动态解耦,并建立等效模型,包括:

获取加载数据和中央处理器核心数量;

根据所述加载数据和所述中央处理器核心数量进行暂态仿真,利用遗传算法,对计算线路的中央处理器数量和计算各个元件的中央处理器数量,进行分配,得到分配结果;所述分配结果包括各个中央处理器对应的节点类型、数量和所在的线路;

20 根据所述分配结果,构建仿真任务分解模型;

采用节点分裂法,对所述各个元件的配电网信息物理系统中物理网络对应的仿真任务分解模型,进行与所述各个元件的元件类型对应的动态解耦,得到解耦后的模型;

根据所述解耦后的模型,构建所述各个元件的网络间的等效模型和元件与网络之间的等效模型;所述等效模型包括所述网络间的等效模型和所述元件与网络之间的等效模型。

25 8、根据权利要求1-3任一项所述的方法,其中,所述基于所述仿真平台架构,利用可靠性评估指标对所述配电网信息物理系统进行可靠性仿真评估,确定所述配电网的可靠性仿真结果,包括:

根据深度搜索法分别对配电网的供电路径和通信网络进行搜索,确定最小供电路径和最短通信链路;

30 采用蒙特卡洛方法,根据所述最小供电路径和所述最短通信链路,在多个元件中随机抽取N个元件,计算所述N个元件的正常工作时间和故障修复时间;

根据路由表和关联关系,查找每个负荷节点直接影响的目标元件;

重新对目标元件分别抽取新随机数,并根据所述新随机数分别计算所述目标元件的修正工作时间;

35 将所述目标元件的修正工作时间、正常工作时间和故障修复时间之和作为所述目标元件的新正常工作时间;所述目标元件的新正常工作时间用于下一一次的工作时间模拟过程;

持续进行工作时间模拟,直至任一元件的正常工作时间达到预设仿真年限,得到各个元件的目标正常工作时间和目标故障修复时间;

根据所述各个元件的目标正常工作时间和目标故障修复时间,计算负荷节点评价结果和可靠性评价结果;所述可靠性仿真结果包括所述负荷节点评价结果和所述可靠性评价结果。

40 9、根据权利要求8所述的方法,其中,所述元件包括:物理侧元件和信息侧元件,所述目标元件包括:目标物理侧元件和目标信息侧元件;

所述根据所述各个元件的目标正常工作时间和目标故障修复时间,计算负荷节点评价结果和可靠性评价结果,包括:

45 根据各个物理侧元件的目标正常工作时间和目标故障修复时间,以及各个信息侧元件的目标正常工作时间和目标故障修复时间,计算所述负荷节点评价结果;

根据所述各个物理侧元件的目标正常工作时间和目标故障修复时间,计算物理侧可靠性评价结果;

根据所述各个信息侧元件的目标正常工作时间和目标故障修复时间,计算信息侧可靠性评价结果;所述可靠性评价结果包括所述物理侧可靠性评价结果和所述信息侧可靠性评价结果。

50 10、根据权利要求1-3任一项所述的方法,其中,所述可靠性评估指标包括物理侧可靠性评估指标;

所述方法还包括:

基于所述仿真平台架构,根据获取的各个元件的故障率和各个设备的故障率,利用预先构建的不同形式的可靠性评估模型和物理侧可靠性评估指标,进行所述配电网信息物理系统的物理侧可靠性评估,确定物理侧可靠性仿真结果;所述可靠性仿真结果包括所述物理侧可靠性仿真结果;

5 其中,所述不同形式的可靠性评估模型包括多个组件串联构成的串联式单元、多个组件并联构成的并联式单元,以及多个组件并联后与表决器串联构成的表决式单元。

11、根据权利要求 10 所述的方法,其中,所述物理侧可靠性评估指标包括持续停电指标、瞬时停电指标,以及与负荷相关的指标;

10 其中,所述持续停电指标包括以下至少一项:系统平均停电频率、系统平均停电时间、用户平均停电持续时间、用户总平均停电时间、用户平均停电频率、平均供电可用率和用户多次供电指标;所述与负荷相关的停电指标包括以下至少一项:平均系统停电频率和平均系统停电持续时间;所述瞬时停电指标包括:平均瞬时停电频率。

12、根据权利要求 1-3 任一项所述的方法,其中,所述可靠性评估指标包括信息侧可靠性评估指标,所述信息侧可靠性评估指标包括:网络连通度可靠性和网络性能可靠性;

15 其中,所述网络连通度可靠性包括以下至少一项:连通度、粘聚度、混合连通系数、网络基本可靠度、端对端可靠度和全端可靠度;所述网络性能可靠性包括以下至少一项:平均故障间隔时间和平均故障修复时间。

13、一种配电网仿真系统,所述系统包括:

20 平台搭建部分,被配置为根据配电网中信息系统与物理系统之间的模型差异性、交互影响,以及多场景仿真验证的规模和精度,进行多层级、多尺度的平台架构建模,得到仿真平台架构;

融合部分,被配置为在所述仿真平台架构上,根据所述配电网中所述物理系统与所述信息系统之间的耦合特性,对时变信息、非确定条件下的信息物理仿真系统进行融合建模,得到配电网信息物理系统;

25 故障仿真部分,被配置为基于所述仿真平台架构,在所述物理系统、通信网络及所述信息系统的并发故障场景下,对所述配电网信息物理系统进行实时仿真,确定所述配电网的故障仿真结果;所述故障仿真结果用于向所述配电网信息物理系统的故障隔离决策和故障恢复决策提供支持;

可靠性仿真部分,被配置为基于所述仿真平台架构,利用可靠性评估指标对所述配电网信息物理系统进行可靠性仿真评估,确定所述配电网的可靠性仿真结果。

14、一种配电网仿真设备,所述设备包括:

30 存储器,被配置为存储可执行计算机程序;

处理器,被配置为执行所述存储器中存储的可执行计算机程序时,实现权利要求 1-12 任一项所述的方法。

15、一种计算机可读存储介质,存储有计算机程序,被配置为用于被处理器执行时,实现权利要求 1-12 任一项所述的方法。

35

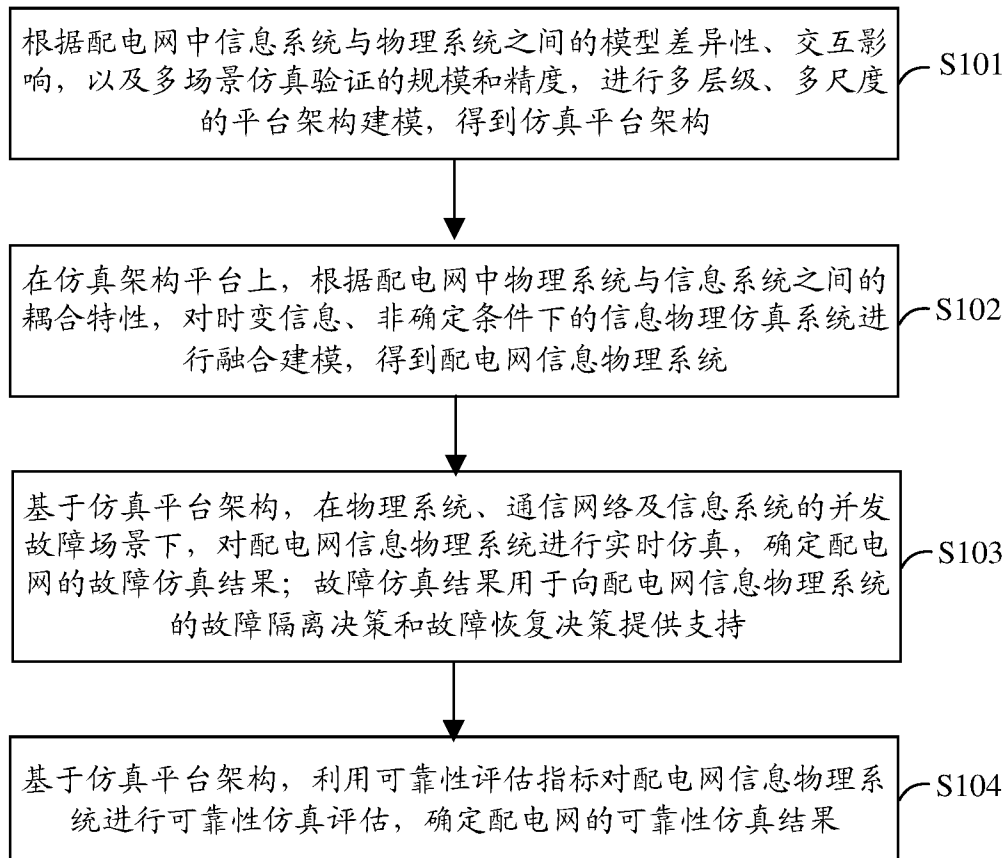


图 1

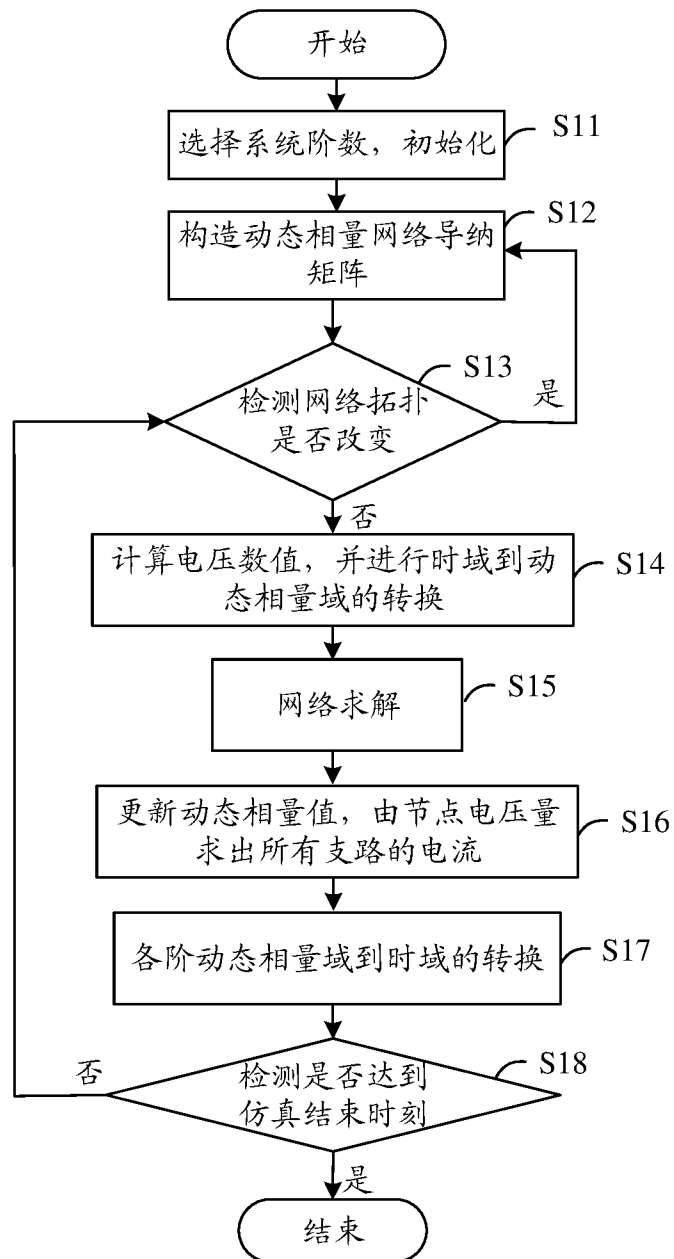


图 2

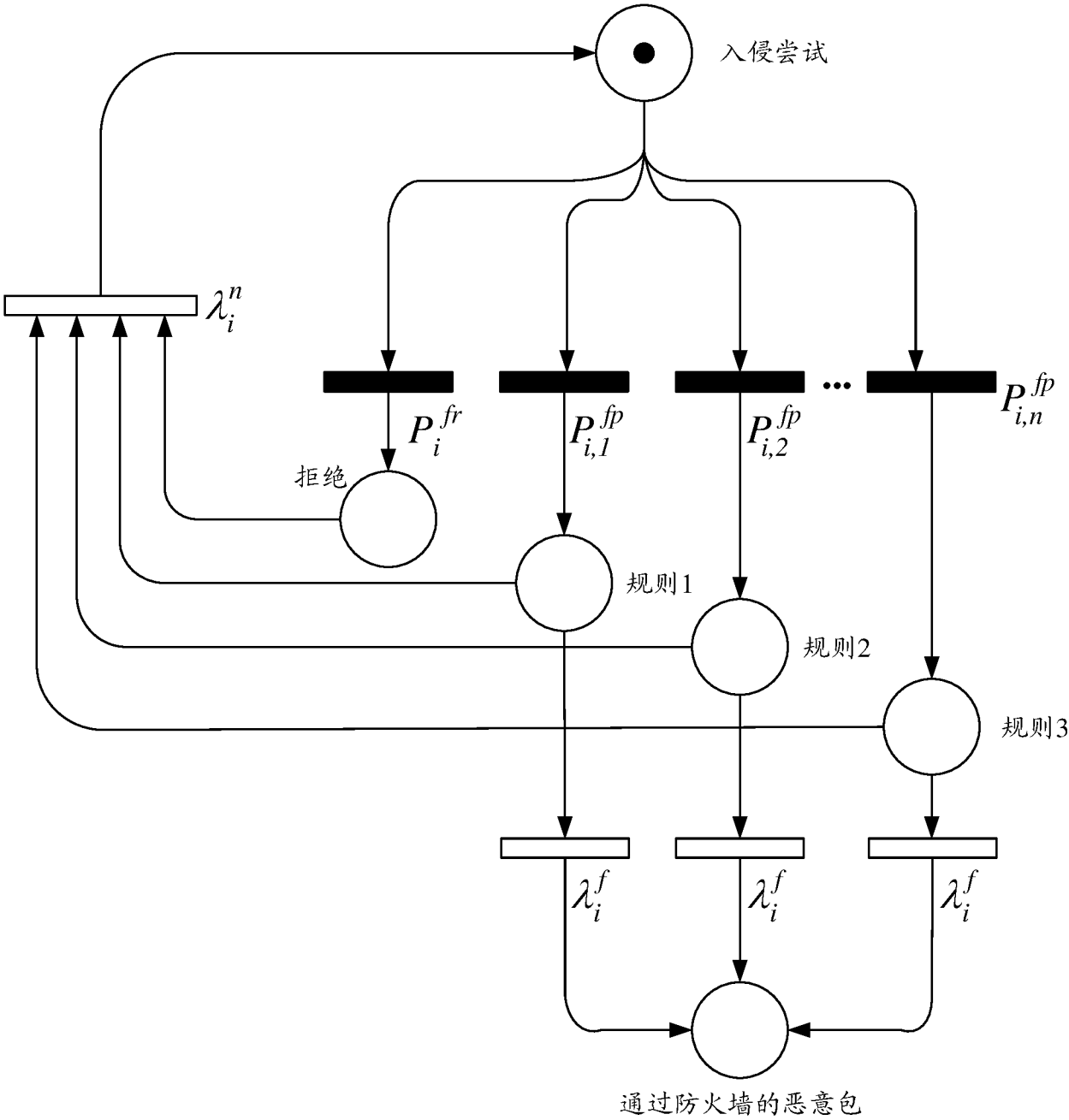


图 3

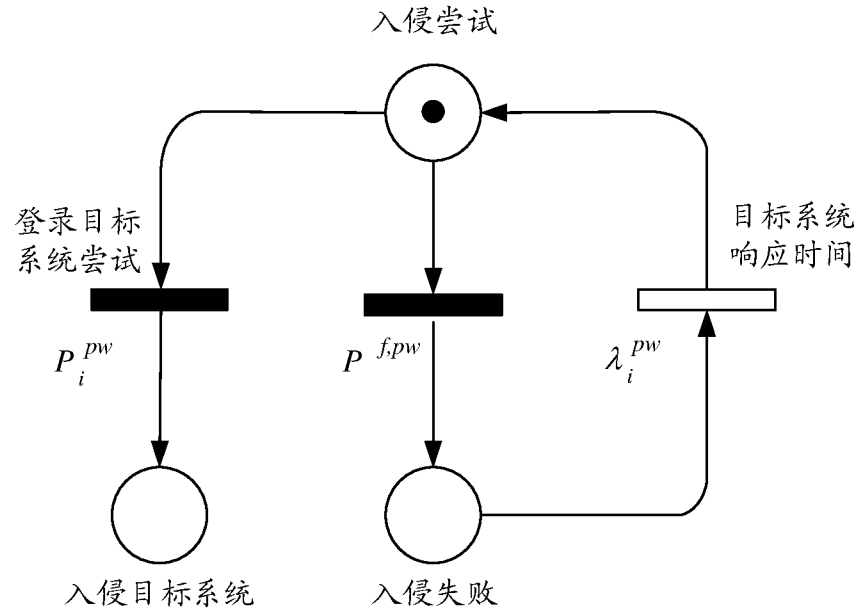


图 4

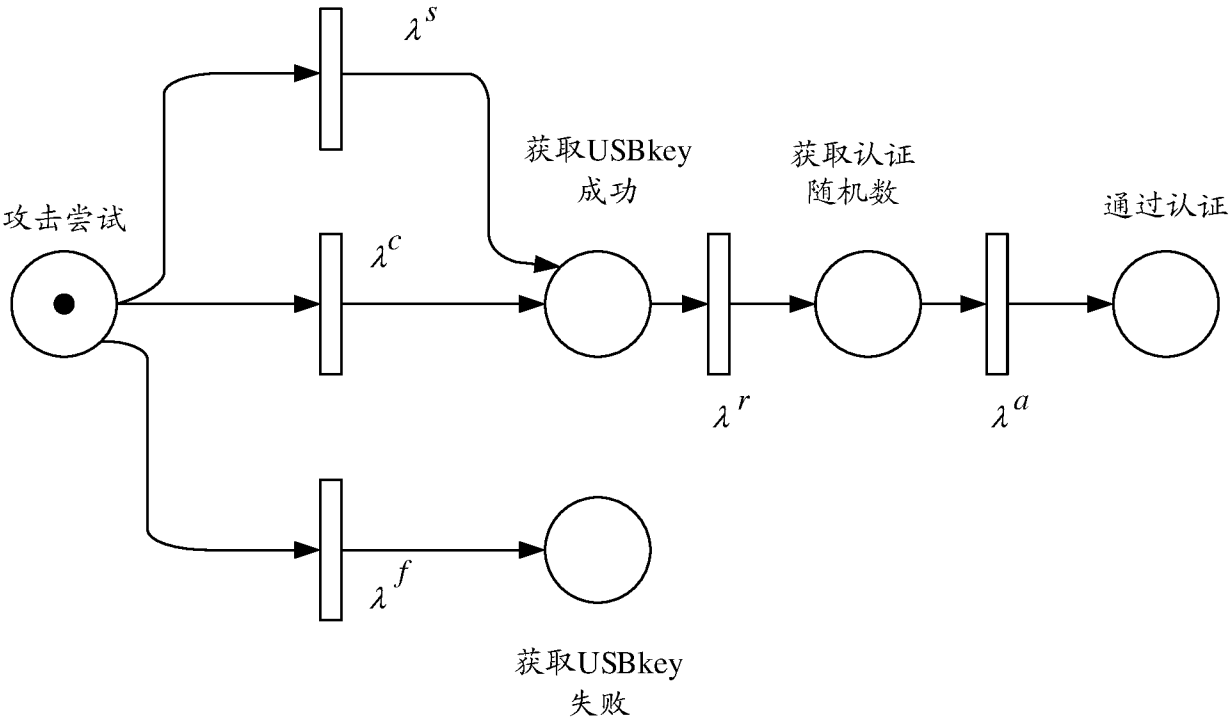


图 5

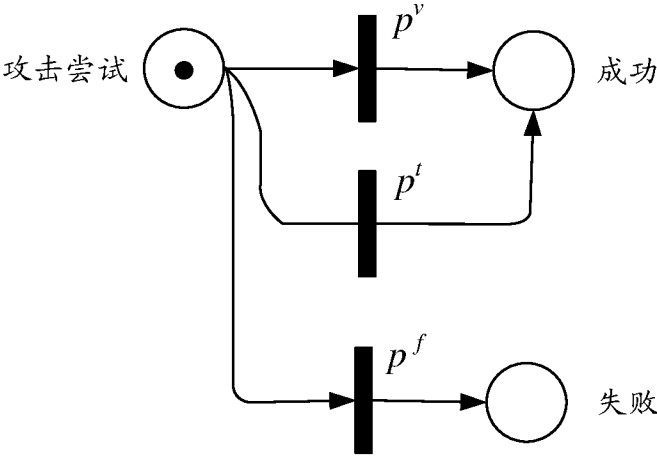


图 6

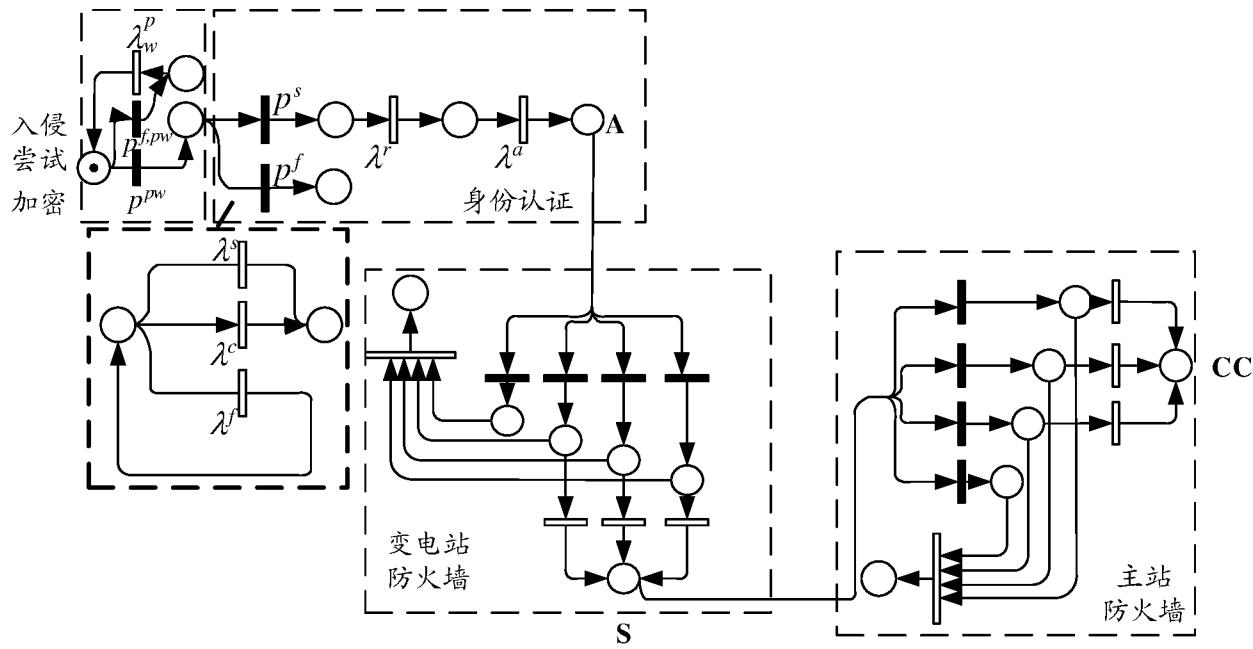


图 7

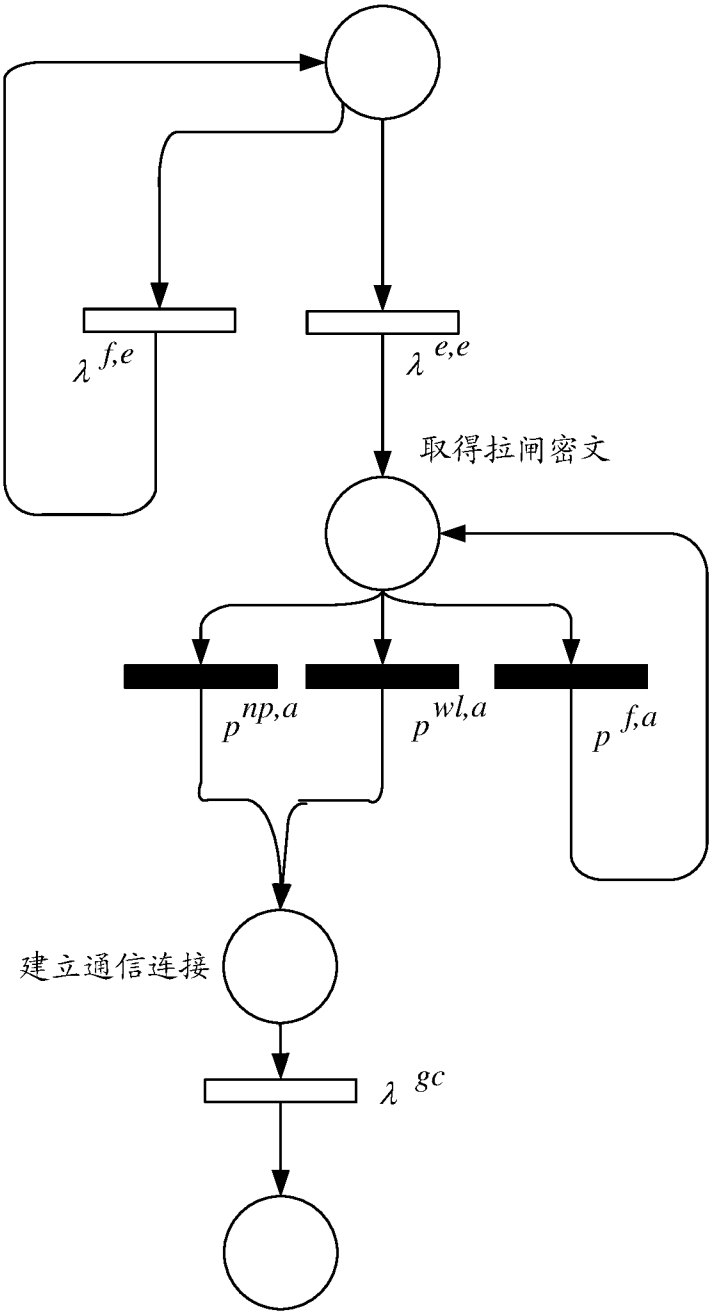


图 8

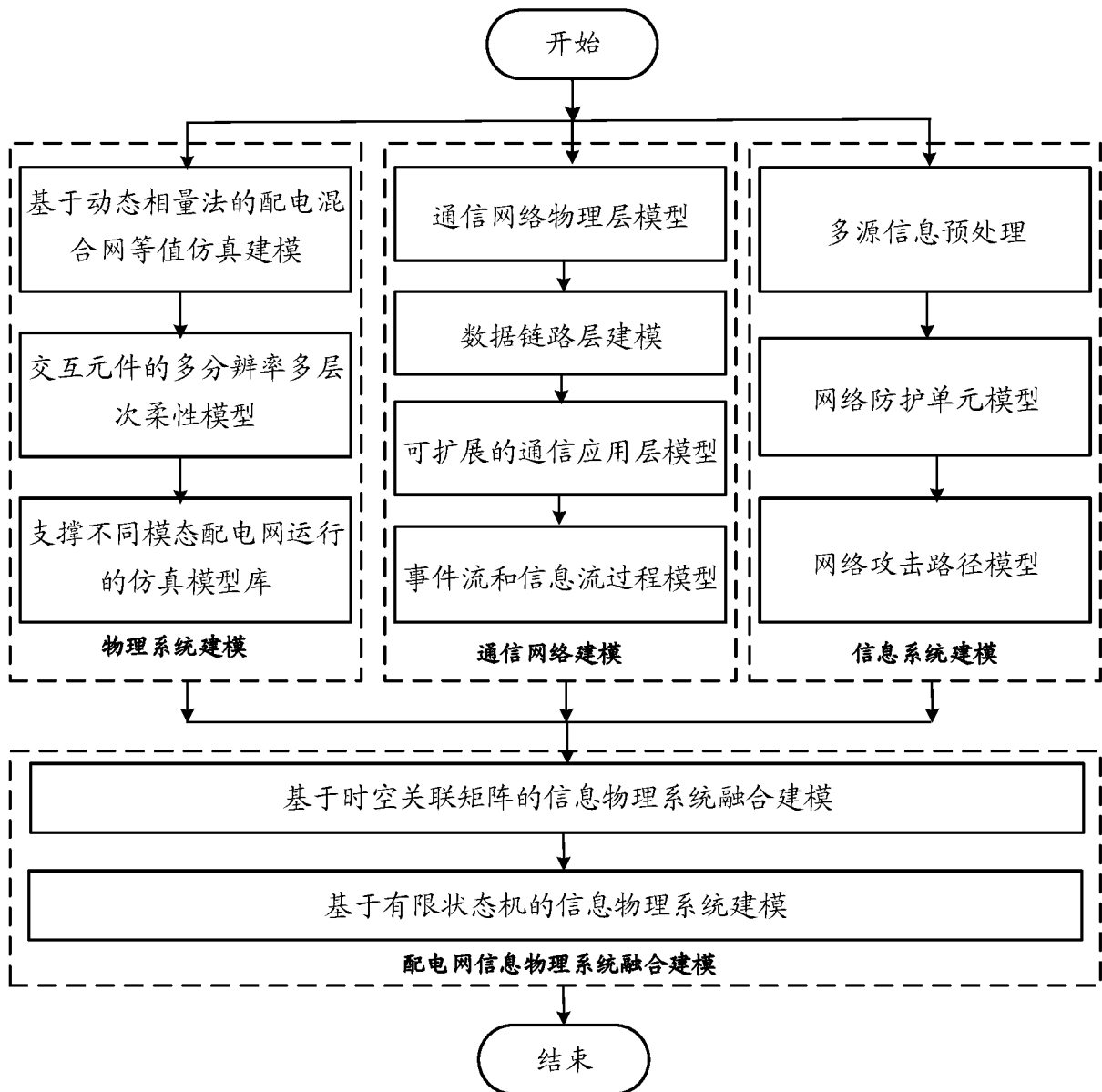


图 9

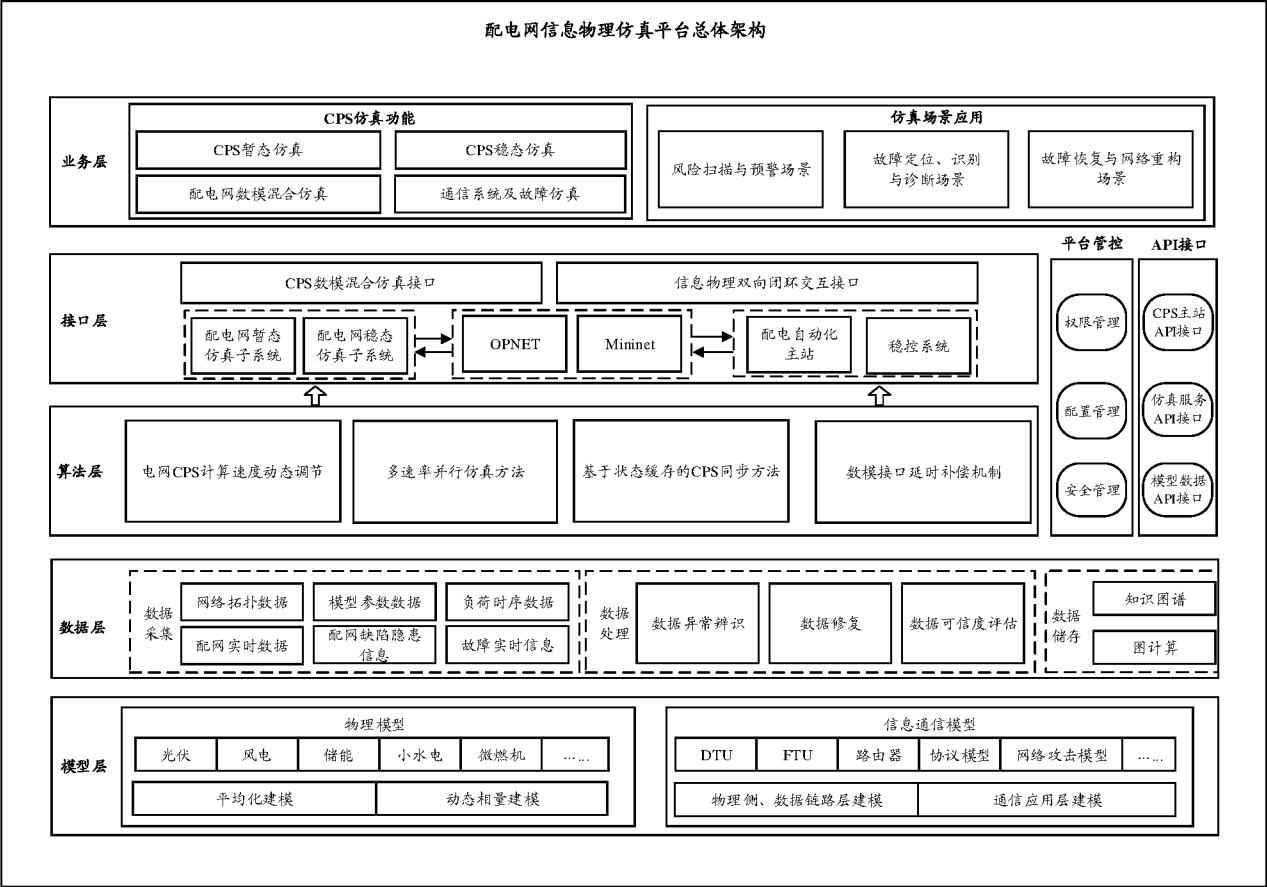


图 10

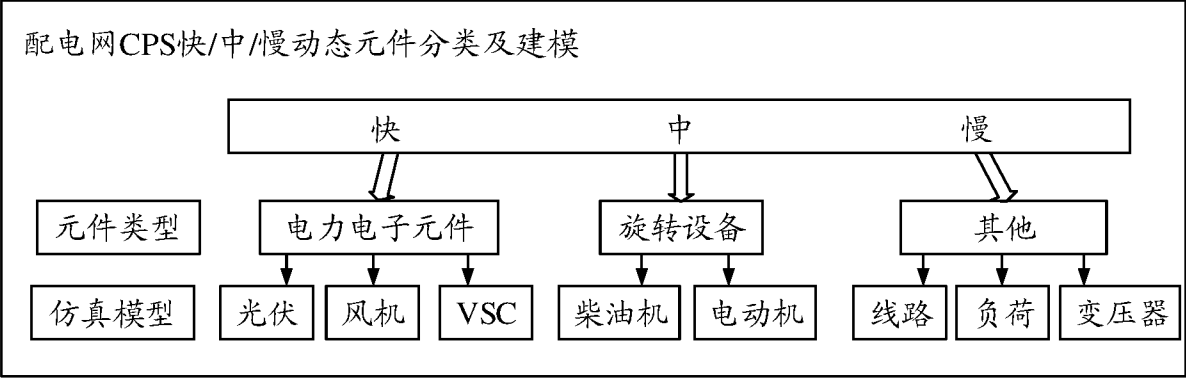


图 11

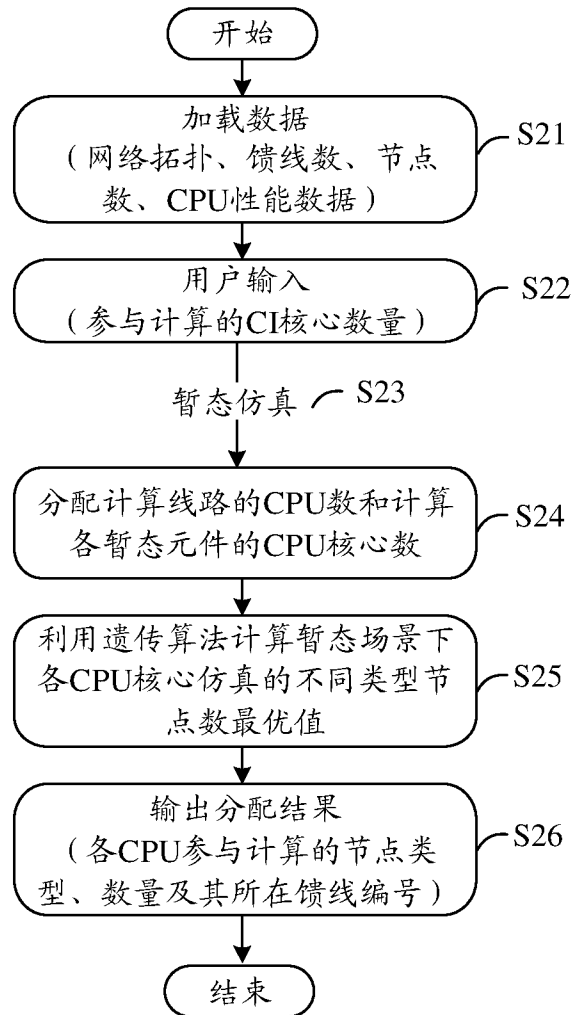


图 12

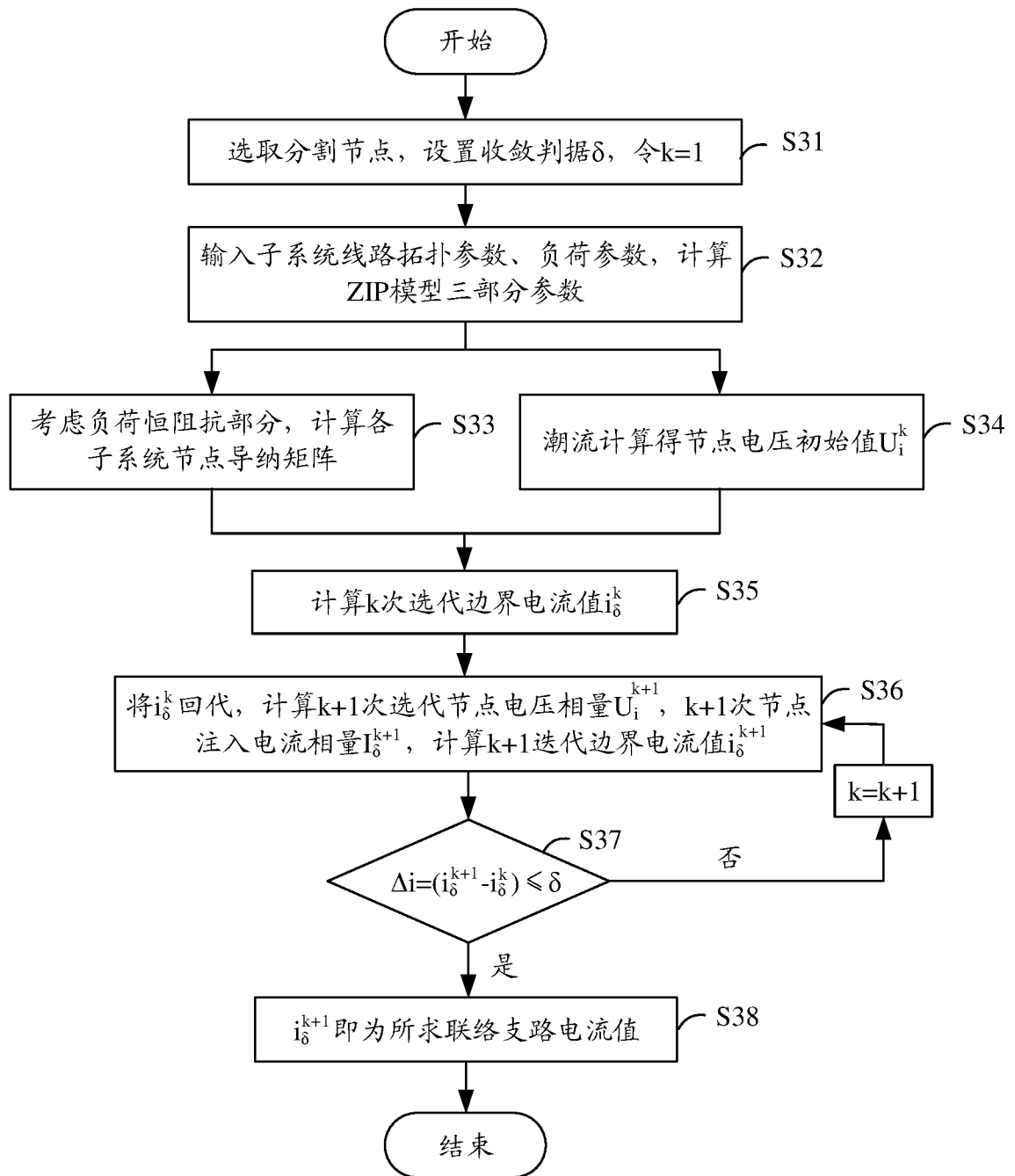


图 13

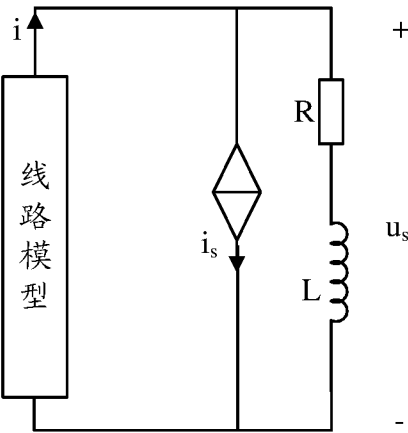


图 14a

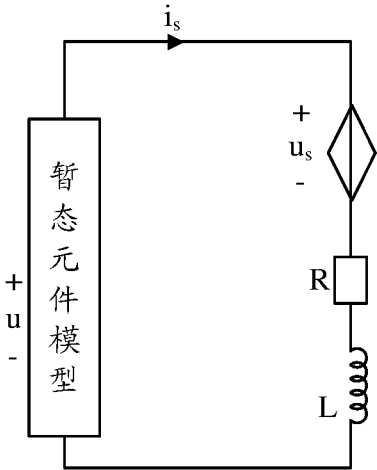


图 14b

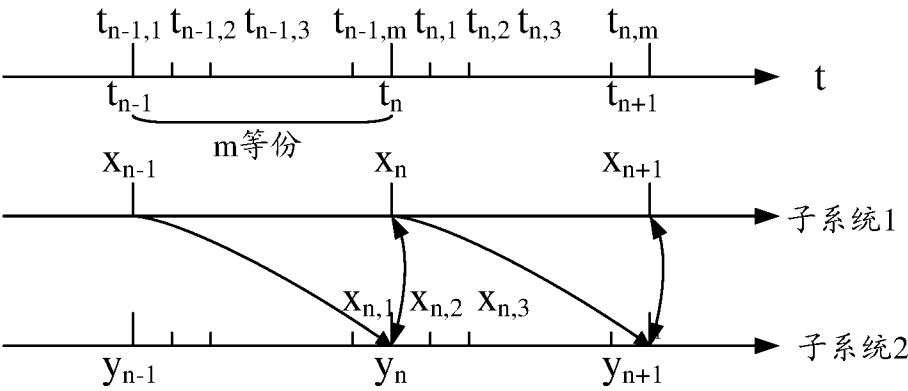


图 15

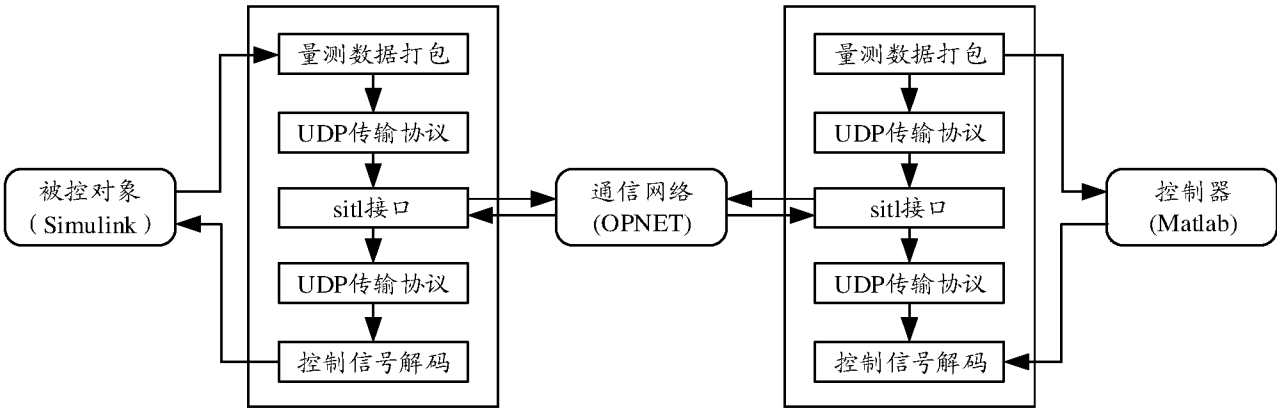


图 16a

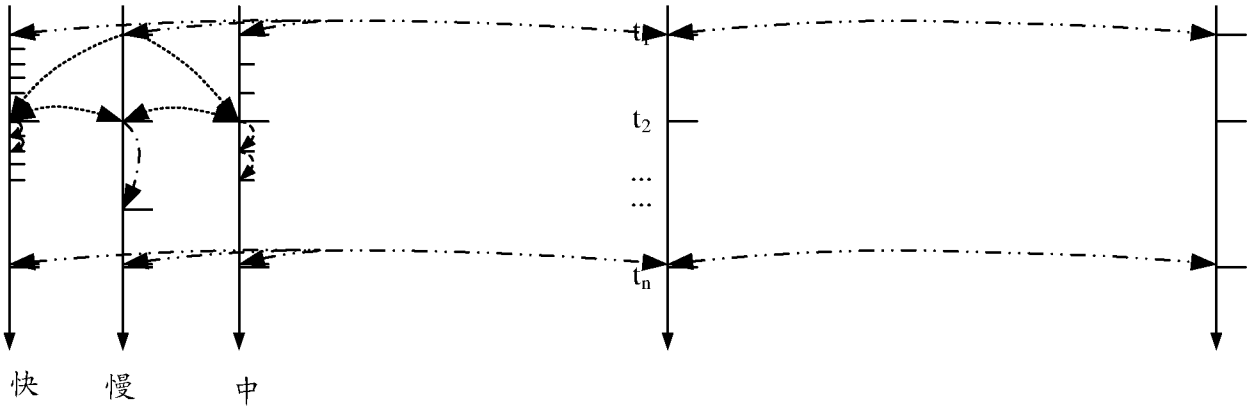


图 16b

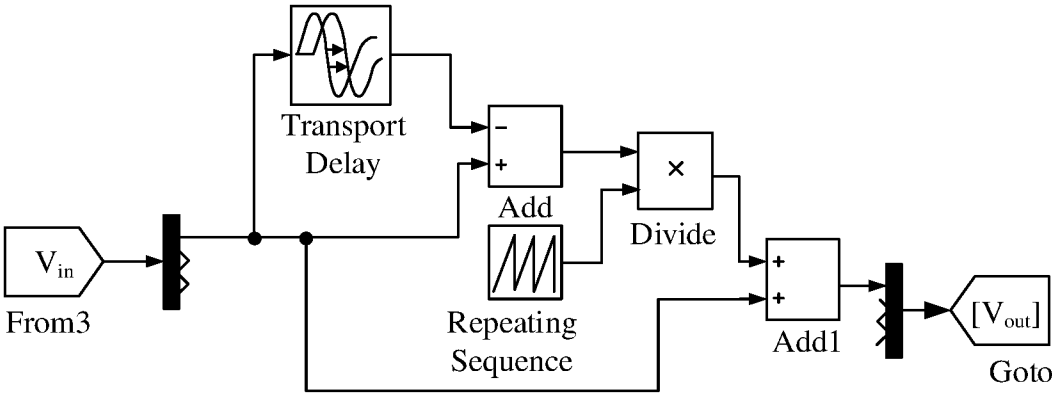


图 17

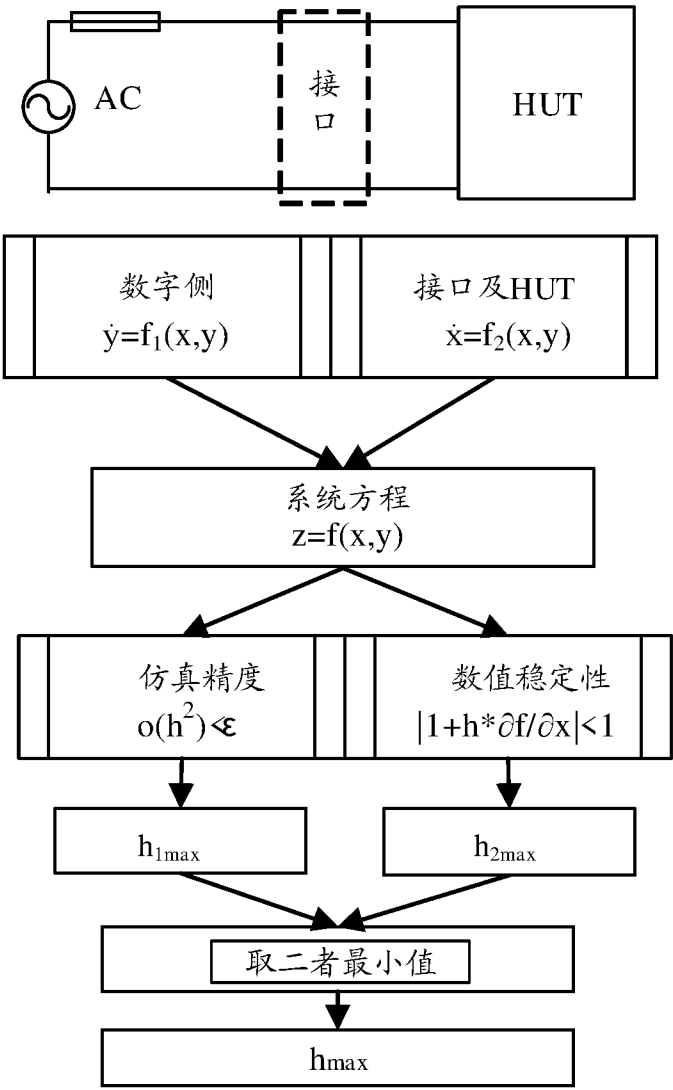


图 18

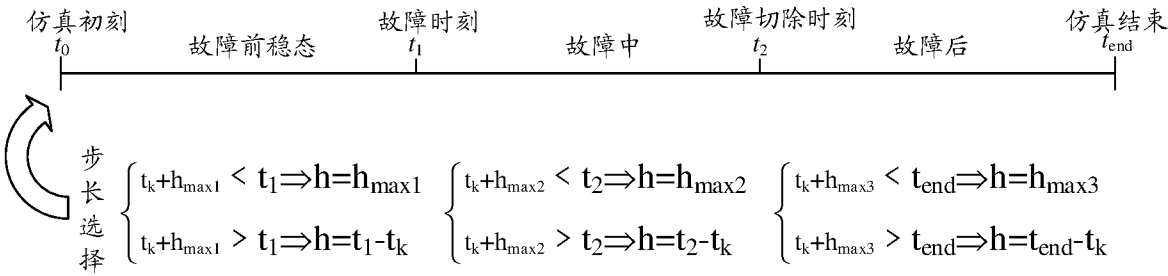


图 19

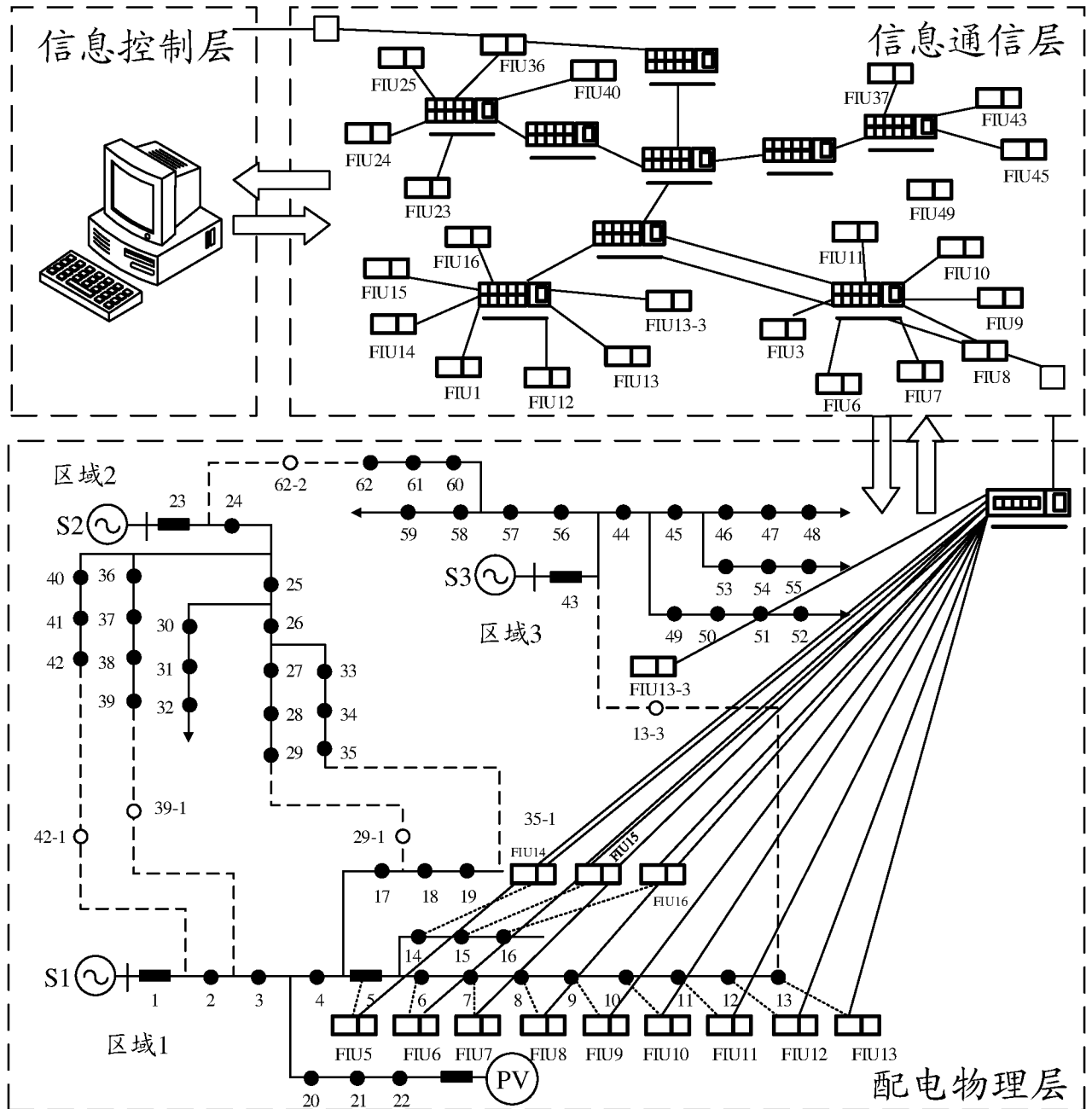


图 20

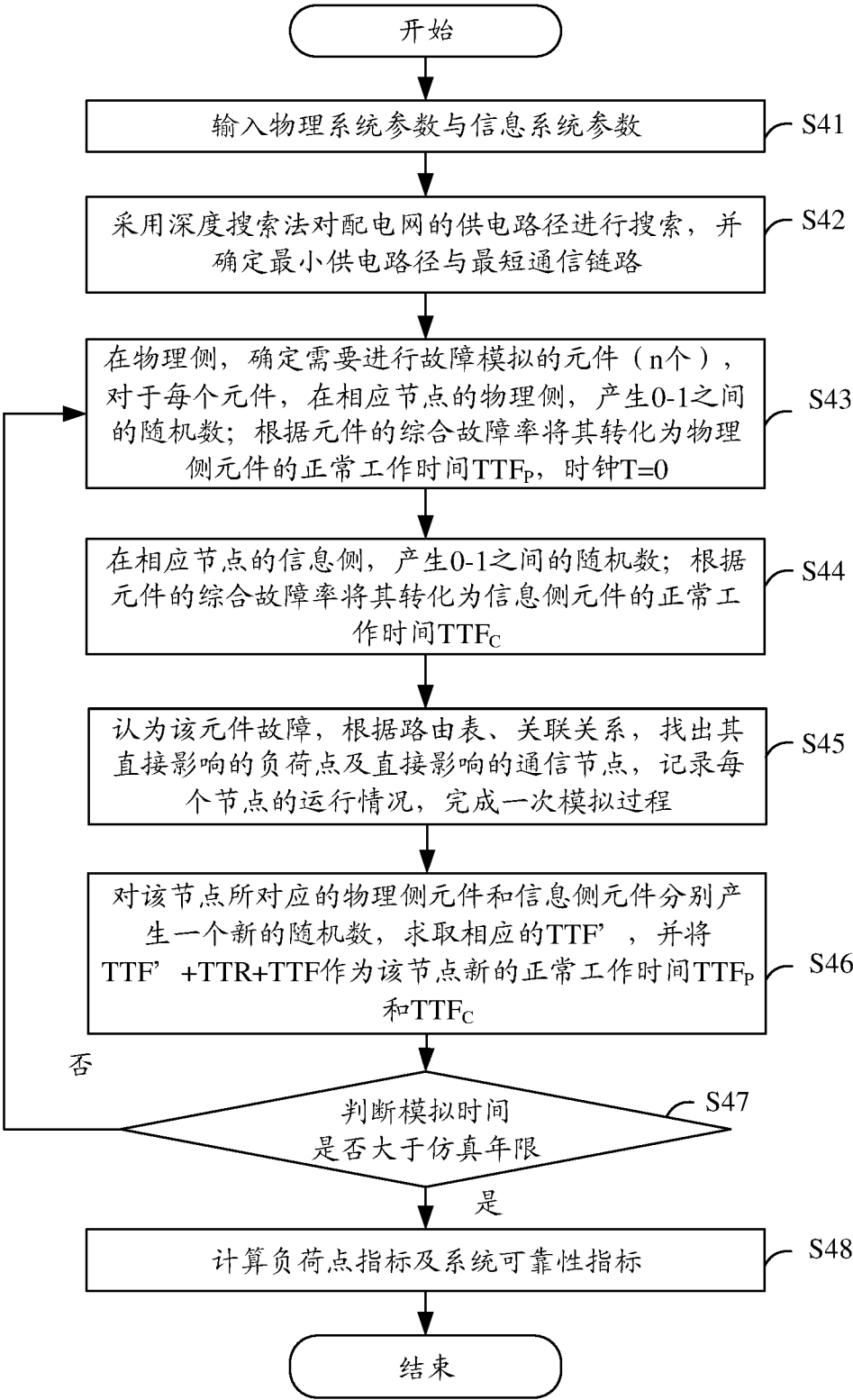


图 21

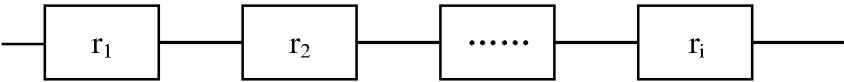


图 22a

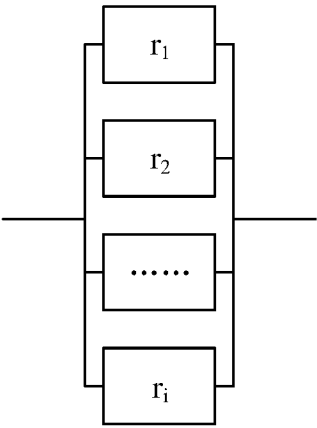


图 22b

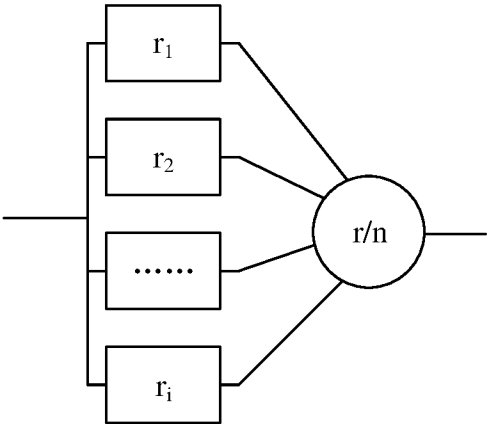


图 22c

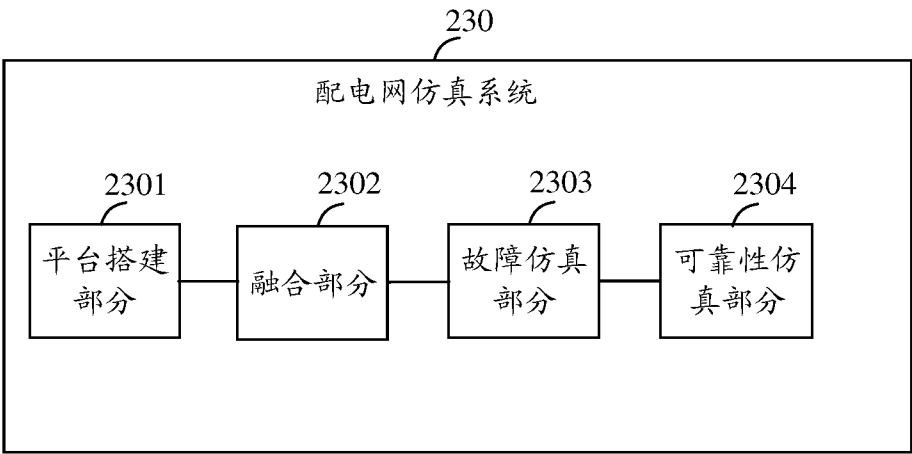


图 23

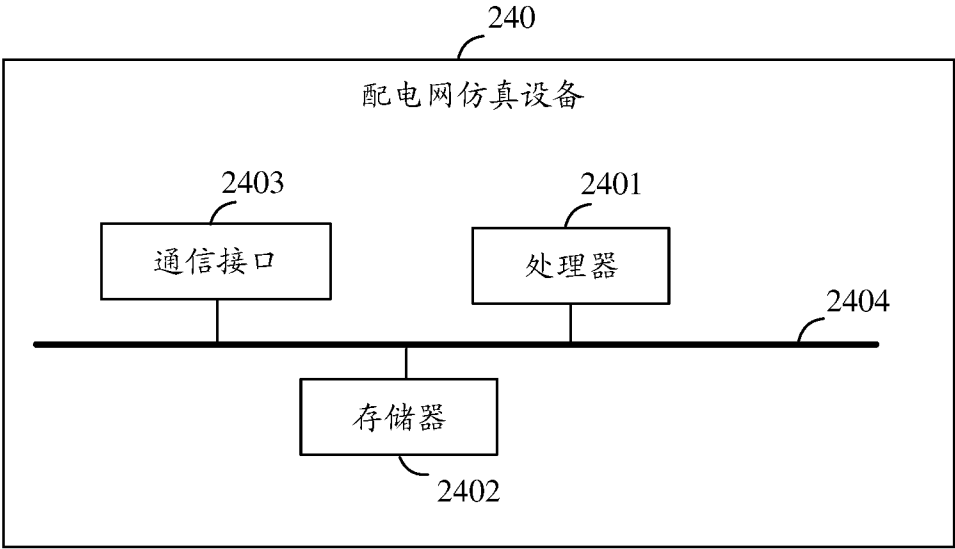


图 24

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2022/131777

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H02J13/00(2006.01)i; H02J3/00(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC: H02J3, H02J13

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNTXT, CNKI, ENTXT, IEEE: 电网, 配网, 电力, 信息系统, 物理系统, 信息物理系统, 联合, 融合, 建模, 仿真, 故障, 可靠性, 有限状态机, 蒙特卡洛, Cyber Physical System, CPS, co-simulation, co-modeling, fault, reliability, finite state machine, FSM, Monte Carlo, MC

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	赵煜 (ZHAO, Yu). "基于CPS的配电网故障处理仿真关键技术研究 (Research on Key Technology of Fault Processing Simulation Based on Cyber Physical System in Power Distribution Network)" 中国博士学位论文全文数据库 (China Doctoral Dissertations Full-Text Database), No. 03, 15 March 2022 (2022-03-15), abstract, full text, pages 12-51	1-15
Y	CN 111697566 A (ZHEJIANG UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 22 September 2020 (2020-09-22) description, pages 2-9	1-15
A	CN 109960849 A (CHINA ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE CO., LTD. et al.) 02 July 2019 (2019-07-02) entire document	1-15
A	CN 111077803 A (NARI TECHNOLOGY CO., LTD. et al.) 28 April 2020 (2020-04-28) entire document	1-15



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"D" document cited by the applicant in the international application

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

18 June 2023

Date of mailing of the international search report

23 June 2023

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/
CN)
China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District,
Beijing 100088

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2022/131777

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 2013024037 A1 (YOUTECH, INC.) 24 January 2013 (2013-01-24) entire document	1-15

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2022/131777

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
CN	111697566	A	22 September 2020	None	
CN	109960849	A	02 July 2019	None	
CN	111077803	A	28 April 2020	None	
US	2013024037	A1	24 January 2013	None	

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2022/131777

A. 主题的分类

H02J13/00(2006.01)i; H02J3/00(2006.01)i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

IPC: H02J3, H02J13

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))

CNTXT, CNKI, ENTXT, IEEE: 电网, 配网, 电力, 信息系统, 物理系统, 信息物理系统, 联合, 融合, 建模, 仿真, 故障, 可靠性, 有限状态机, 蒙特卡洛, Cyber Physical System, CPS, co-simulation, co-modeling, fault, reliability, finite state machine, FSM, Monte Carlo, MC

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
Y	赵煜. “基于CPS的配电网故障处理仿真关键技术研究” 中国硕士学位论文全文数据库, 第03期, 2022年3月15日 (2022 - 03 - 15), 摘要、正文第12-51页	1-15
Y	CN 111697566 A (浙江工业大学) 2020年9月22日 (2020 - 09 - 22) 说明书第2-9页	1-15
A	CN 109960849 A (中国电力科学研究院有限公司 等) 2019年7月2日 (2019 - 07 - 02) 全文	1-15
A	CN 111077803 A (国电南瑞科技股份有限公司 等) 2020年4月28日 (2020 - 04 - 28) 全文	1-15
A	US 2013024037 A1 (YOUTECH, INC.) 2013年1月24日 (2013 - 01 - 24) 全文	1-15

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“D” 申请人在国际申请中引证的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2023年6月18日

国际检索报告邮寄日期

2023年6月23日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中国国家知识产权局

中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

授权官员

董立波

电话号码 (+86) 010-53961431

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2022/131777

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN	111697566	A	2020年9月22日	无	
CN	109960849	A	2019年7月2日	无	
CN	111077803	A	2020年4月28日	无	
US	2013024037	A1	2013年1月24日	无	