

# 含大量继保和安自装置的连锁故障并行仿真软件研发

徐得超<sup>1</sup>, 刘巍<sup>2</sup>, 朱旭凯<sup>1</sup>, 夏天<sup>1</sup>, 朱全胜<sup>2</sup>, 徐树文<sup>1</sup>, 陈德扬<sup>1</sup>

(1. 中国电力科学研究院, 北京 100192; 2. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450052)

**摘要:** 基于MPI实现了一种基于用户自定义建模思想的含有大量继电保护和自动装置的连锁故障并行仿真软件。软件首先采用面向对象的自定义建模方法, 完成大量继电保护和自动装置建模; 然后采用分网并行和分组并行计算技术, 将大规模电网进行网络分割, 分配给子网进程; 将大量继电保护和自动装置模型进行分组划分, 分配给外接进程。任务分配后的数据被提交到并行集群上, 执行连锁故障的并行仿真。由于子网进程和外接进程由不同的CPU并行计算, 程序效率得以提高, 能在用户可接受的时间内完成大电网的连锁故障仿真。

**关键词:** 用户自定义建模; 连锁故障; 并行计算; 自动装置; 继电保护; 面向对象设计

## Research and development of cascading failure simulating software containing many relaying protections and automatic safety devices

XU De-chao<sup>1</sup>, LIU Wei<sup>2</sup>, ZHU Xu-kai<sup>1</sup>, XIA Tian<sup>1</sup>, ZHU Quan-sheng<sup>2</sup>, XU Shu-wen<sup>1</sup>, CHEN De-yang<sup>1</sup>

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 2. State Grid Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, China)

**Abstract:** A cascading failure parallel simulating software which can simulate working of many relay protections and automatic safety devices in power system is implemented based on MPI and user-defined modelling technique. First, by designing user-defined modeling approach using object-oriented method, modeling of many relay protections and automatic safety devices is completed. Then using parallel computing techniques of splitting power grid and grouping models, the large-scale power grid network is partitioned into several subnets assigned to these processes named subnet-process; and the grouped models for relay protections and automatic safety devices are assigned to these process named external process by group. The data after splitting grid and grouping models are submitted to the parallel cluster and the parallel simulating for cascading failure is starting. Because the subnet-process and external process are executed in parallel by different CPUs, simulating efficiency can be improved, and cascading failure simulating can be completed within an acceptable time of users.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (863 program) (No. 2011AA05A105).

**Key words:** user-defined modeling; cascading failure; parallel computing; security automatic equipment; relay protection; object-oriented designing

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)21-0132-007

## 0 引言

正常情况下的电力系统是一个动态平衡的系统<sup>[1]</sup>。但如果电网发生故障导致电压电流发生大幅度波动并越限, 电网内继电保护及安全自动装置将相继动作, 可能导致系统状态的进一步恶化, 引起连锁故障<sup>[2]</sup>。机电暂态仿真主要研究电力系统受到大扰动

后的暂态稳定性, 可用于分析受到诸如短路故障, 切除线路、发电机、负荷, 发电机失去励磁或者冲击性负荷等大扰动作用下, 电力系统的动态行为和保持同步稳定运行的能力, 是进行连锁故障仿真的手段之一<sup>[3-4]</sup>。

通过机电暂态仿真研究大电网连锁故障, 主要过程是建立符合实际的电网模型和元件模型, 计算分析连锁故障的演变过程及其后果, 并给出预防连锁故障扩展蔓延的措施。其难点之一在于电网中大量自动装置的建模, 主要包括继电保护装置和安全

**基金项目:** 国家高技术研究发展技术(863计划)课题(2011AA05A105); 国家电网公司科技项目(XT71-12-011)

自动装置<sup>[5-6]</sup>。继电保护装置种类多,既有主保护又有后备保护,原理复杂,而且随着电网发展,新型的继电保护装置层出不穷。安全自动装置涉及的控制结构更为复杂、在电网中经常跨区域控制。保护种类多和原理的纷繁复杂给继电保护和安自装置建模带来了软件编码和模型维护的难度和工作量,是大电网连锁故障仿真的挑战之一<sup>[7-14]</sup>。

连锁故障仿真的另一个难点在于,在大规模电网中,继电保护装置和安全自动装置数量多,规模庞大,导致计算量激增。以继电保护装置为例,如果采用用户自定义方式建模,一个继保装置由几十到上百个基本功能框组成,一个万节点的电力系统安装的继电保护装置将有几万个。如果采用交替求解法进行机电暂态仿真,一个时步内还需要进行多次迭代。如此下来,计算量将十分惊人。

针对机电暂态仿真研究大电网连锁故障在建模和模型维护方面的难点,本文设计面向对象的用户自定义建模方法,充分利用面向对象的封装、继承、多态特性解决建模过程中遇到的可扩展性和可维护性差的问题。针对连锁故障仿真过程中计算量激增,本文结合分网并行和分组并行技术,利用子网进程和外界进程,构建连锁故障并行仿真系统,共同承担电网和模型的计算任务。应用表明,本文构建的并行仿真系统能有效减少仿真计算时间,达到用户可接受的时间范围内。

本文的主要贡献在于将原有研发的孤立功能集成,构建连锁故障并行仿真系统,使得大电网背景下大量继电保护和安自装置建模和连锁故障仿真实用化。

## 1 连锁故障并行仿真系统流程

本文连锁故障并行仿真系统仿真流程如图1所示。图中进程分为两类:一类是子网进程,承担分网并行计算任务,负责联络系统或者某一个子网的连锁故障仿真。对于输入量和输出量位于同一子网的继保和自动装置模型,也由该子网进程负责计算,以减少进程间通信量。在子网进程中,进程号为0的进程称为主控进程,负责数据与模型分发、联络系统计算以及本子网的仿真。其他子网进程负责各自子网与模型的仿真。子网进程对应着图1中中间栏与右侧栏。

另一类是外界进程,承担分组并行计算任务,负责用户指定的继电保护和安自装置模型(以下简称模型)以及输入输出量跨子网边界的模型仿真计算。根据用户的指定情况,可以有多个外界进程,每个外界进程负责一组模型的计算。外界进程对应

图1中左侧栏。

连锁故障并行仿真过程共分8个大步骤,分别为装置建模、网络分割与模型分发、通信接口初始化、输入量计算、模型初始化计算与输出量处理、电网与模型仿真和结果输出。每个大步中又分为若干小步骤,如在第2步网络分割与模型分发中,主控进程0读入全网数据,网络分割方案,模型拓扑结构描述以及外接模型配置文件等信息(如②),然后确定设备和模型所属子网进程号并分发(如③),非主控子网进程则接收本子网计算数据(如④)以及本进程负责计算的模型信息(如⑤),外接进程则读入模型拓扑结构描述信息(如⑥)。第3步通信接口初始化则分析外接模型的输入输出量所关联的设备信息,确定它们所属的子网,然后发送给负责计算该模型的外接进程(如⑧),由外接进程接收处理并排序后发送给对应子网进程(如图⑦,⑨,⑩,⑪)。在第4步输入计算中,子网进程除了计算本子网仿真模型的输入量外,还需要计算本子网内部外接模型的输入量,然后发送给对应外接进程。

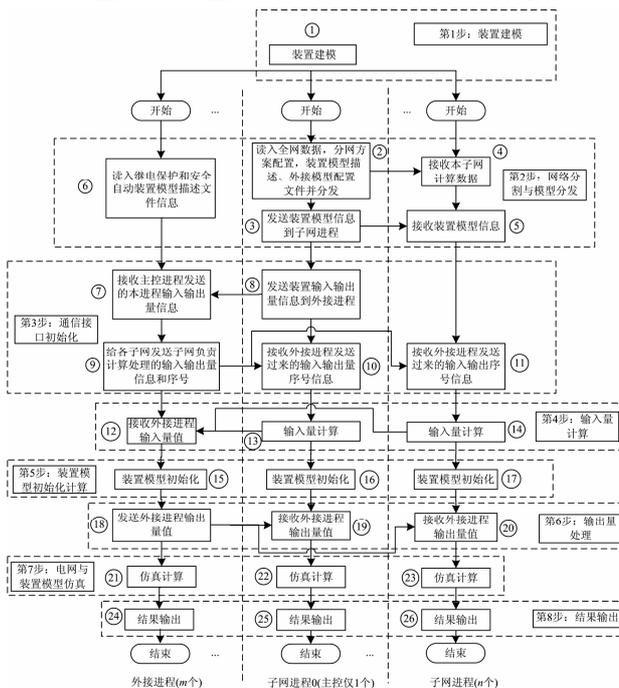


图1 连锁故障并行仿真流程

Fig. 1 Flow chart of cascading failure parallel simulating

## 2 装置建模方法

本文采用用户自定义建模来完成大规模继电保护装置和安全自动装置的建模,并设计统一的仿真方法进行模型仿真。这样既解决了新增装置的建模仿真问题,又能保证建模过程的可扩展性和良好的维护性。装置建模过程分以下三步。

1) 定义基本功能框。基本功能框是用户自定义

建模的具有基本运算功能的最小功能单元，包含微分积分框、代数运算框、逻辑函数框、线性非线性控制等。

2) 定义基本功能框之间的拓扑。为了表示基本功能框之间的拓扑，定义基本功能框之间的连接公共点为端子。基本功能框之间的端子既表示前一个功能框的输出量，又代表后一个功能框的输入量。基本功能框和端子的关系可用图 2(a)表示。图中，功能框 1, 2, 3 之间有两个端子，分别是 1 和 2。2 号端子是 1 号框的输出，同时是 2, 3 号框的输入。

3) 定义基本功能框构成图的不相交割集为组合功能框。组合功能框可以看成是一个抽象的基本功能框。和基本功能框一样，组合功能框具有输入量和输出量。其定义过程如图 2(b)和图 2(c)。

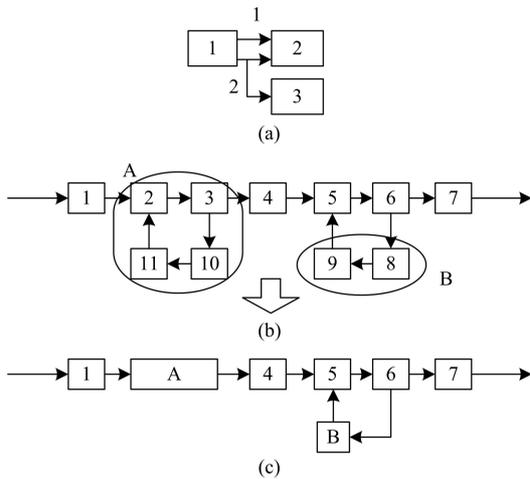


图 2 端子与基本功能框及其组合功能框

Fig. 2 Diagram of terminals, basic function and the combination of them

图 2(b)中 2、3、10、11 四个基本功能框组成图中一个割集，形成组合功能框 A，8、9 两个基本功能框组成图中与 A 不相交的一个割集，形成组合功能框 B。割集操作后形成新的用户自定义模型图如图 2(c)所示。图 2(b)和图 2(c)在功能上是等价的。提出组合功能框的意义在于：一些基本功能框可以组合成常用的组合功能框，并加入用户自定义模型库，从而便于模型的复用与扩展，方便用户自定义建模。

结合上述用户自定义建模过程，本文采用面向对象的软件开发方法实现装置的建模过程，如图 3 所示。

图 3(a)描述了参数类、端子类和基本功能框类的关系。其中参数类描述模型中如时间常数、定值等属性。端子类描述模型中各功能模块之间的拓扑。

基本功能框可以看作是装置中的各种功能元件的抽象，包含有与其他功能框的拓扑描述以及功能元件的一些公共的功能，如初始化、参数设定、计算等，这些功能被设计成虚化的函数，所有其他功能框均可继承该基本功能框的属性与功能，以实现面向对象的多态。如图 3(b)中加法框类、积分框类、限值框类等。图 3(c)中引入模型类。模型类从基本功能框类继承，具备基本功能框的一切属性，兼具有管理功能框、端子以及参数等的的能力。

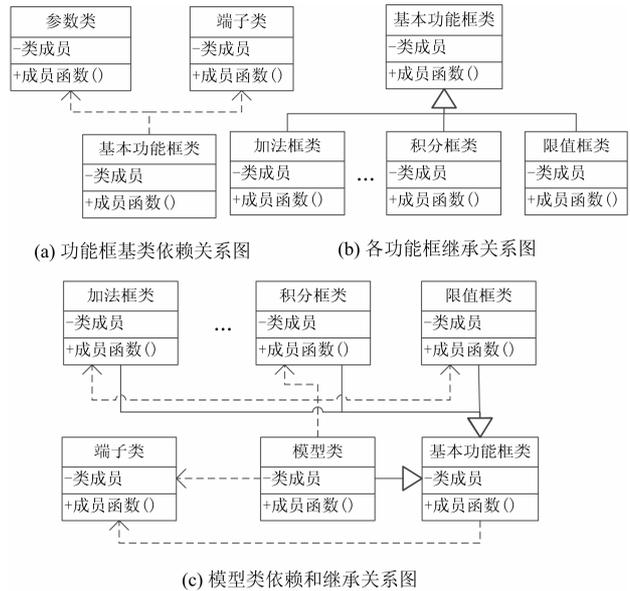


图 3 面向对象的继保与安全装置建模

Fig. 3 Object-oriented relay protection and safety automatic device modeling

### 3 并行仿真方法

本文连锁故障并行仿真方法由分网并行方法和分组并行方法，以及它们之间的接口组成。分网并行方法求解电网主系统，包括电网方程组和动态元件有关的微分方程组，由于网进程负责计算。分组并行方法求解用户指定的用户自定义模型，由外接进程负责。当有用户自定义模型输入输出量跨子网时，软件能自动指定其由外接进程负责。

#### 3.1 分网并行方法<sup>[15-17]</sup>

电力系统机电暂态仿真中网络方程的求解可归结为大型稀疏线性方程组的求解问题：

$$Ax = b$$

其中： $A$  为对称稀疏阵，即导纳矩阵； $x$  为待求的未知数向量，即电压修正向量； $b$  为已知的右端项向量。稀疏线性方程组的通用解法是三角分解法，解向量可由前代回代步骤得出。

本文采用一种适于分网并行的方法—端口逆矩

阵法<sup>[15-16]</sup>来求解线性方程组。该方法的基本原理是根据  $A$  阵逆阵在边界点上的对应元素组成的边界点系数阵, 以及  $A$  矩阵去掉边界点元素后求得的相应边界点初步解, 求取边界点的准确解。然后求出各子网边界点右端项修正量, 从而实现各子网的并行求解。该方法能够保持原有串程序计算过程完整性, 减少并行化开发工作量, 提高软件可靠性。

### 3.2 分组仿真方法

继保和安自装置等电网二次控制系统在连锁故障仿真过程中由于数量大而占用大量计算时间。由于网络分割, 部分继保和安自装置的模型会随着分网而被分配到其关联设备子网中, 计算自然并行化。但是对于跨子网的模型, 以及那些分配过多模型的子网中模型, 可以设置多个分组, 设计分网并行和分组并行之间的接口, 在多个外接进程中并行仿真, 实现分组并行计算。

分组并行计算仿真算法包括模型的初始化计算和仿真两部分, 二者均基于用户自定义模型的传递函数框图, 关键在于确定每个基本功能框的计算顺序, 本文采用了文献[12]中算法。

### 3.3 分网并行和分组并行接口

本文连锁故障并行仿真系统中, 分网并行计算由子网进程负责, 而分组并行计算主要由外接进程负责。它们之间的关系是多对多的关系, 也就是说, 一个子网进程可能与多个外接进程通信, 一个外接进程也可能与多个子网进程通信。图 4 描述了子网进程和外接进程之间并行仿真接口关系, 虚线左侧是子网进程的计算过程, 右侧是外接进程的计算过程。图 4 中  $n$  代表仿真时步的计数,  $k$  代表一个步长内网络方程组与微分方程组交替迭代的计数, 初始化为 0。左侧框 1 到 9 是一个时步内子网进程计算过程, 框 10 到 12 是外接进程计算过程。当  $k=0$  时, 需要保存上一时步电压量和状态量仿真结果, 如框 1 和框 11 所示。框 2 中子网进程根据电网元件存储位置和外接进程输入变量类型, 按照第  $n$  时步电压量和状态量求取外接进程输入变量值, 由 MPI 通信接口发送到外接进程。外接进程接收到输入量后, 采用 3.2 节用户自定义仿真算法计算输出量。与此同时, 框 3 可以并行进行微分方程组数值积分, 求网络方程组右端项注入电流。框 4 通过 MPI 接口从外接进程取得外接模型的输出量, 并修正网络方程组右端项注入电流。框 5 求解网络方程组。框 7 进行迭代收敛性检查, 如果收敛, 则结束本步长计算, 否则进行下一次迭代, 转到框 2。

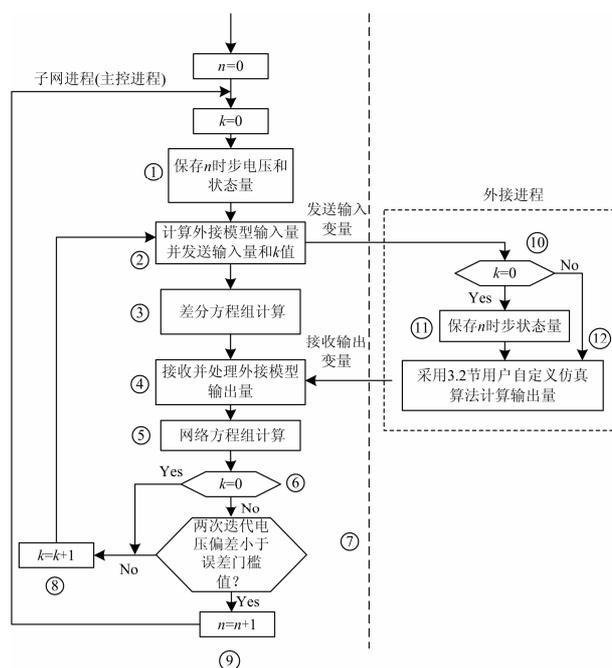


图 4 子网进程和外接进程并行仿真方法

Fig. 4 Parallel simulating method between subnet process and extern process

图 4 中, 框 2 到框 10, 以及框 12 到框 4 是子网进程和外接进程的 MPI 通信接口部分, 它们是一对多的关系。为提高仿真效率, 本文在仿真初始化阶段, 根据外接模型的进程分配、输入输出量相关子网进程分布情况, 对 MPI 通信接口部分进行分析, 确定数据交换的顺序与结构。具体来讲, 在子网进程侧, 按照外接进程排序, 分别形成输入量的元件位置、变量类型信息数组, 并申请对应顺序的变量值缓存; 而在外接进程侧, 则按照外接模型的排序, 同样分别形成输入输出量元件位置、变量类型信息、和变量值缓存数组, 并形成这两个缓存数组的位置映射关系。这样在仿真计算阶段, 可以根据形成的顺序和索引快速检索, 大大提高程序整体效率。

## 4 仿真算例

本文采用河南电网 2013 年冬季大方式为例, 验证本文实现方法的计算效率与效果。计算机环境为 Intel 至强处理器 X5650, 主频 2.67 GHz 共 1 台, 内存 16 G, 缓存 12 M, 同时支持 16 个进程并行计算。电网和采用用户自定义模型的继保和安自装置仿真规模如表 1 和表 2 所示。

### 4.1 连锁故障仿真效果测试

以河南电网周口地区为例测试连锁故障仿真效果, 其与河南主网接线示意图如图 5 所示。测试案

例运行方式安排如下：周口地区 500 kV 电压等级层面通过邵陵-周口 500 kV 双回线与漯河地区相连，其中邵周 I 回因检修停运；220 kV 电压等级层面通过邵陵至川汇、邵陵至淮阳、薛坡至桐丘三回线与河南主网相连。此运行方式下，周口地区整体供电能力不足，其发电出力仅包括隆达电厂单台 135 MW 机组，地区负荷主要由与河南主网相连的联络线承担。

表 1 电网测试规模

Table 1 Testing scale of power system

计算母线	交流支路	直流线	发电机	负荷	开关	有效厂站
17 919	25 880	13	1 552	3 772	13 576	428

注：有效厂站指含厂站主接线的厂站，虚拟厂站未计算在内。

表 2 用户自定义模型测试规模

Table 2 Testing scale of user-defined models

覆盖区域	相关线路 与变压器	相关 母线	继电保护 装置数	安自装 置数	基本计算 功能框数
河南电网 500 kV 及局部 220 kV	261	648	1 173	45	138 716

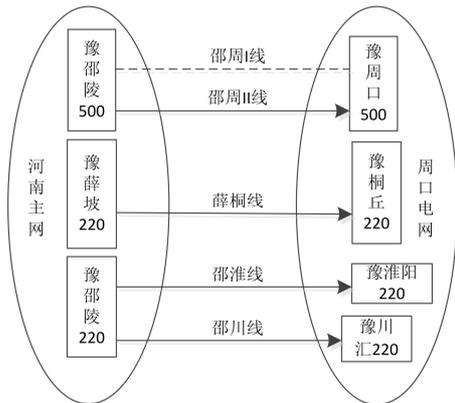


图 5 周口地区电网与河南主网接线示意图

Fig. 5 Connection diagram of Zhoukou grid and Henan main grid

周口地区继电保护和安自装置的自定义模型主要安装在 9 个变电站内，其中 500 kV 站 1 个，220 kV 站 8 个，涉及线路 18 条。自定义模型均依据实际的继电保护和安自装置建模，具体涉及到许继电气的 WBH-801 变压器保护，WXH-803 和 WXH-802 线路保护装置，国电南自 PSL-602G 和 PSL-603G 线路保护装置，国电南瑞 RCS-931AM, RCS-925A, RCS-931B 线路保护装置和 RCS-990A 稳控装置，以及四方公司的 WGQ-871 线路保护装置等。

周口地区 RCS-990A 稳控系统由 500 kV 周口变、220 kV 川汇变、淮阳变、水寨变 4 个厂站组成。其中，周口变为稳控主站，川汇变、淮阳变为稳控子站，水寨变为远切负荷执行站。稳控系统主要功

能如下：监视 500 kV 邵周双线的运行状态，接收川汇变发送的邵川线电流、功率；接收淮阳变发送的邵淮线、薛淮线电流、功率。当系统判断出 500 kV 邵周双线跳闸（检测 2 条线路功率代数和的绝对值小于“低功率门槛”定值）时，若同时检测到邵川线、邵淮线、薛淮线中的任一条发生过载时，装置进入过载动作逻辑，经延时后分轮次向切负荷执行站（川汇、淮阳、水寨）发远方切负荷命令。

本测试案例中连锁故障的触发故障为 500 kV 邵周 II 线首端三相短路故障，引发继电保护装置动作，切除故障线路邵周 II 线。在此故障情况下，连锁故障软件在邵川线、邵淮线和薛桐线处观测到的仿真结果（功率，电压和电流）如图 6 所示。

由图 6 中曲线可以看出，当 500 kV 邵周 II 线因故障断开情况下，原 500 kV 线路承担功率转移至三个 220 kV 断面，其中邵淮线、邵川线电流过载超限，超出周口安稳装置整定值，稳控装置动作，7.28 s 第一轮切负荷（川汇变）后，邵川线过载解除，10.71 s 第二轮切负荷（淮阳变）后，邵淮线过载解除。从算例仿真结果可以看出，周口地区继保和安自装置动作与实际情况吻合，说明了连锁故障仿真软件的正确性。

#### 4.2 连锁故障仿真效率测试

采用 4.1 节所述的算例，测试连锁故障仿真软件效率，测试规模见表 1 和表 2，仿真时间 20 s。文中分别采用串行和分网并行计算进行比较，其中有外接 UD 并行方案中电网被划分为 8 个子网，河南电网被划分为豫西、豫北电网，剩余部分电网被划分到子网 2 中。自定义模型共有 1 218 个继保与安自装置，其中因为网络分割共有 87 个模型的输入输出来源于不同的子网，因此被划分为 3 组，放入 3 个外接进程中。仿真效率对比结果如表 3 所示。

表 3 连锁故障仿真效率测试结果

Table 3 Results for simulating efficiency testing

方案	电网 分网数	自定义模 型分组数	二者通信 时间/s	计算 总时间/s	加速比
串行	1	0	0	287	1.00
有外接 UD 并行	8	3	1.39	161	1.78

从表 3 的结果可以看出，将用户自定义模型置入外接进程中仿真，并通过 MPI 接口与仿真主程序接口，通信带来的效率减低影响并不大，只有 1.39 s，占仿真总时间的 0.8%。但在此案例中，采用分网并行计算加速比并不高，这是因为所有自定义模型均集中安装在河南电网，因此计算的效率实际上被河南电网所在子网计算效率所限制。

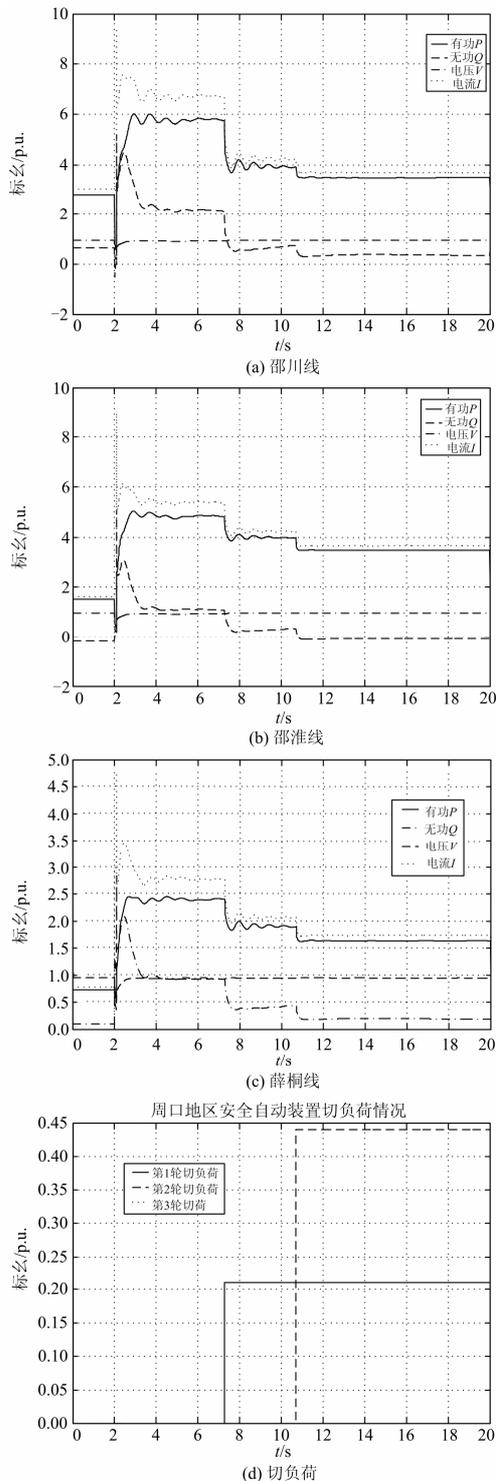


图6 周口地区连锁故障仿真结果

Fig. 6 Cascading failure simulating results for Zhoukou

尽管如此, 采用外接进程仿真自定义模型可以解决输入输出跨子网的模型的仿真问题, 并能实现不同进程间数值积分的部分并行计算, 对提升程序效率有积极作用。

## 5 结论

本文针对含有大量继电保护和自动装置的大规模电网连锁故障仿真, 提出一种基于 MPI 的并行仿真软件构建方法。在该方法中, 大量继电保护和自动装置采用面向对象设计的用户自定义建模方法实现, 以便于继保和安自装置模型库的维护与扩展; 大规模电网和大量采用用户自定义建模的二次控制装置按照分网并行和分组并行思想, 划分为子网进程和外接进程, 一起并行仿真计算。案例分析表明, 该并行仿真方法能够有效模拟大规模电网的连锁故障过程, 并能有效提高仿真效率, 使用户在可接受的时间内完成连锁故障仿真。

限于实际电网继保和安自装置整定值的收资与建模工作繁琐以及工作量巨大, 本文只在河南电网主网和部分地区 220 kV 电网部署了继保和安自装置模型, 对于大规模电网全网部署模型的效果尚待实际案例检验。

## 参考文献

- [1] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York, USA: McGraw-Hill, 1994.
- [2] 于洋, 黄民翔, 辛焕海. 基于动态仿真的连锁故障分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(20): 15-21.  
YU Yang, HUANG Min-xiang, XIN Huan-hai. Cascading outage analysis based on dynamic simulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(20): 15-21.
- [3] 汤涌. 电力系统数字仿真技术的现状与发展[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(17): 66-70.  
TANG Yong. Present situation and development of power system simulation technologies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(17): 66-70.
- [4] 朱雨辰, 赵冬梅, 刘世良. 基于机电暂态-电磁暂态混合仿真的电网合环分析计算系统[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(23): 73-79.  
ZHU Yu-chen, ZHAO Dong-mei, LIU Shi-liang. Loop closing analytical calculation system based on electromagnetic-electromechanical transient simulation for power network[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(23): 73-79.
- [5] 孙元章, 杨军, 张晓东. 电力系统动态仿真中的继电保护模型[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(20): 47-51.  
SUN Yuan-zhang, YANG Jun, ZHANG Xiao-dong. Relay protection model for dynamic simulation of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(20): 47-51.

[6] 汤必强, 李峰, 於益军. 计及自动装置模拟的大电网在线静态安全分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 107-111.  
TANG Bi-qiang, LI Feng, YU Yi-jun. Online state security analysis considering[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 107-111.

[7] 王增平, 姜宪国, 张执超, 等. 智能电网环境下的继电保护[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 13-18.  
WANG Zeng-ping, JIANG Xian-guo, ZHANG Zhi-chao, et al. Relay protection for smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 13-18.

[8] 唐艳茹. 区域系统安全自动装置专题研究报告[J]. 继电器, 1999, 27(4): 30-34.  
TANG Yan-ru. Study report on the regional system security automatic device[J]. Relay, 1999, 27(4): 30-34.

[9] 吴国昉, 宋新立, 汤涌. 电力系统动态仿真中的安全稳定装置系统建模[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(3): 71-75.  
WU Guo-yang, SONG Xin-li, TANG Yong. Modeling of security and stability control system for power system dynamic simulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(3): 71-75.

[10] 王治国, 李兴建, 王言国. 基于统一建模的继电保护测试装置开发研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 180-185.  
WANG Zhi-guo, LI Xing-jian, WANG Yan-guo. Research on the development of relay protection tester based on unified building mode[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 180-185.

[11] 吴中习, 周孝信, 包忠明. 暂态稳定计算中的用户自定义模型[J]. 电网技术, 1991, 15(3): 46-50.  
WU Zhong-xi, ZHOU Xiao-xin, BAO Zhong-ming. User-defined modeling in power system transient simulation[J]. Power System Technology, 1991, 15(3): 46-50.

[12] 孟新军, 徐得超, 李亚楼. PSASP 用户自定义建模优化算法研究[J]. 电网技术, 2012, 36(7): 214-218.  
MENG Xin-jun, XU De-chao, LI Ya-lou. Research on optimization algorithm for user-defined modeling of power system analysis software package[J]. Power System Technology, 2012, 36(7): 214-218.

[13] 黄英怀. 电力系统分析综合程序的用户自定义模型[J]. 广东电力, 2002, 15(5): 46-48.  
HUANG Ying-huai. User-defined model of power system analysis software package[J]. Guangdong Electric Power, 2002, 15(5): 46-48.

[14] 杨晓东, 黄东平, 陈世勇. 基于全图形建模方式的电力系统仿真系统继电保护库的设计与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(15): 116-119.  
YANG Xiao-dong, HUANG Dong-ping, CHEN Shi-yong. Design and application of the relay protection module library based on the full graphics modeling in power simulation system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(15): 116-119.

[15] 李芳, 郭剑, 吴中习. 基于 PC 机群的电力系统小干扰稳定分布式并行算法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(31): 7-13.  
LI Fang, GUO Jian, WU Zhong-xi. Distributed parallel computing algorithms for power system small signal stability based on PC cluster[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(31): 7-13.

[16] 李芳. 电力系统小干扰稳定分布式并行算法研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2006.

[17] 李亚楼. 大规模电力系统机电暂态实时仿真算法及软件的研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2003.

收稿日期: 2014-02-26; 修回日期: 2014-05-05

作者简介:

徐得超(1975-), 男, 硕士, 高工, 主要从事电力系统数字仿真技术, 配电自动化应用软件研究等; E-mail: xdc@epri.sgcc.com.cn

刘巍(1977-), 女, 硕士, 高工, 研究方向为电力系统计算与仿真分析等;

朱旭凯(1982-), 男, 博士后, 高工, 研究方向为电力系统连锁故障、混合仿真技术。