文章编号:1007－6735(2026)05－0577－13　DOI: 10.13255/j.cnki.jusst.20251019001

基于张量流的多能系统多场景稳态仿真方法

贾晓强[1,2]，　王松岑[1,2]，　陈洪银[1,2]，　庞敬帅[1,2]，　董树锋[3,4]
（1. 电网安全全国重点实验室，北京 100192；2. 中国电力科学研究院有限公司，北京 100192；
3. 浙江大学 电气工程学院，杭州 310000；4. 杭州极简物控科技有限公司，杭州 310051）

摘要：针对用户侧多能系统稳态仿真开发灵活性不足的问题，提出基于张量流的多能系统多场景稳态仿真方法。首先，通过明确信息、物理和业务系统的边界范围和共性特点，建立多能系统通用描述框架。其次，基于张量统一表示多能系统状态数据，通过设计可支持多种触发机制的张量流计算图结构，建立多能系统通用稳态仿真模型。再次，提出多能系统多场景仿真的关键技术。最后，采用多能系统能流计算和优化算例验证所提方法的有效性，并与传统面向对象方法进行对比。研究结果基于张量流的配置化建模与求解为负荷侧多能系统多场景稳态仿真提供了通用、灵活且易于工程落地的解决方案。

关键词：多能系统；稳态仿真；张量流；多场景仿真
中图分类号：TM 743　　**文献标志码：**A

A tensor-flow-based multi-scenario steady-state simulation method for multi-energy systems

Jia Xiaoqiang[1,2], Wang Songcen[1,2], Chen Hongyin[1,2], Pang Jingshuai[1,2], Dong Shufeng[3,4]
(1. *National Key Laboratory of Power Grid Safety, Beijing 100192, China*; 2. *China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China*; 3. *College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310000, China*; 4. *Hangzhou Minimalist Material Control Technology Co., Ltd., Hangzhou 310051, China*)

Abstract: The development flexibility of steady-state simulation for user-side multi-energy systems is limited. This paper proposed a tensor-flow-based steady-state simulation method for multi-energy systems. The boundaries and common characteristics of the physical, information, and business models were clarified, and a general steady-state simulation model was established. System state data were uniformly represented by tensors, and a computation graph supporting periodic, event-driven, and data-driven triggers was designed. Key techniques for multi-scenario simulation were developed. Energy-

收稿日期: 2025−10−19
基金项目: 国家电网公司总部科技项目（5700-202355723A-3-3-JC）
第一作者: 贾晓强（1995—），男，工程师．研究方向：能效分析、负荷管理与综合能源技术研究与应用．E-mail：xqjia001@163.com

引文格式: 贾晓强，王松岑，陈洪银，等．基于张量流的多能系统多场景稳态仿真方法[J]．上海理工大学学报，2026，48(5)：577-589.
Citation: Jia Xiaoqiang, Wang Songcen, Chen Hongyin, et al. A tensor-flow-based multi-scenario steady-state simulation method for multi-energy systems[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2026, 48(5): 577-589.

flow calculation and optimization case studies were carried out to validate the proposed method, and comparisons with the traditional object-oriented approach were performed. The results show that model construction and scenario switching can be realized by configuration without modifying source code; the energy-flow and optimization cases converge reliably and agree with engineering expectations. Parallel scheduling and local recomputation triggered by state changes improve computational efficiency and model reusability. Accordingly, this method provides a general, flexible, and engineering-ready solution for multi-scenario steady-state simulation of user-side multi-energy systems.

Keywords: *multi-energy system*; *steady-state simulation*; *tensor-flow*; *multi-scenario simulation*

2024 年 8 月 6 日，国家发展改革委、国家能源局、国家数据局发布《加快构建新型电力系统行动方案（2024—2027 年）》，明确加快推进新型电力系统建设，为实现碳达峰目标提供有力支撑。负荷侧综合能源系统、虚拟电厂等多能系统能够提升电网平衡调节能力、促进新能源消纳、保障电力供应安全、助力实现“双碳”目标[1-2]，正成为新型电力系统建设的重要内容。随着负荷侧多能系统示范应用蓬勃开展，应用场景和市场主体日渐多元[3]，分布式资源规模化接入，系统运营过程中信息物理多维互动、资源协同调度的复杂性持续凸显，亟需针对多能系统适配多元场景的稳态仿真实现技术开展研究。

当前，国内外对多能系统的稳态仿真开展了一定研究。崔杨等[4]采用区间数学方法描述综合能源系统中的多重不确定性因素，以能源利用效率最高和系统运行成本最低为目标建立多能优化调度模型。刘学智等[5]针对包含第 5 代区域供热供冷的电−热−冷耦合综合能源系统，提出可兼容热产销者的多能流网络模型。Li 等[6]在强化学习中引入个体注意力机制，集中训练多微网系统中所有智能体，实现单个微网内的多能协调分配和互联微网之间的外部多能交互。Huang 等[7]使用能源集线器模型对多能系统中的能量转换、传输和存储过程进行线性描述，通过具有自适应临界区域集的多参数线性规划方法对系统的脆弱性和可靠性进行评估。可以看出，尽管既有研究面向不同场景提出了多种分析与调控技术，但要在工程实践中实现稳态仿真的通用化与标准化并降低跨场景实现难度，需要对多能系统物理对象进行统一抽象与通用化建模，集成可直接调用的常用计算算子/组件，并在统一的框架下承载设计状态与计算的关系，从而实现不同调控方法的一致化实现与快速迁移复用。

在电力能源领域的物理建模方面，针对物理对象的通用性模型及信息对象的建模方法已有相关研究。陈晨等[8]针对智能变电站二次系统的物理回路和逻辑回路，建立了用以标识过程层、间隔层、站控层及其之间联系的二次回路物理连接关系和逻辑连接关系模型。施烨等[9]通过设置功能类型、能源介质类型、介质流向 3 个标签对多能系统内装置进行分类并分别建立各单装置模型，提升多能互补系统优化调度模型的通用性。江昊等[10]分别建立信息网、电网以及交通网模型，通过分析三网之间的层间交互机制，建立了信息网−电网−交通网级联耦合模型。既有模型主要聚焦于控制与物理层的耦合机制，但对于跨场景可复用的不变量（如状态量的统一表述、拓扑约束的通用结构与算子级计算范式）尚缺乏系统性抽象与形式化描述，从而难以支撑多场景稳态仿真的一致化建模与迁移复用。

负荷侧多能系统在典型运行中呈现多介质耦合与多时空尺度并存的特性[11]：潮流平衡、水力/热力约束与设备运行逻辑并行存在，且受周期、事件与数据等多重触发机制驱动[12-13]。在此背景下，既有面向对象的定制式实现于工程化层面暴露出共性不足：缺乏围绕状态、拓扑与约束的统一表达，难以在异构介质之间实现建模单元的标准化与复用；模型描述与求解实现紧耦合，跨场景迁移与快速部署受限；工具链割裂使代数方程与优化模块分置，难以支持并行计算与局部重算[14-15]。上述问题在多介质耦合与多触发共存的多能系统/信息物理系统场景下尤为突出，直接制约了稳态仿真的通用化与工程落地效率。因此，亟需一种建模结构清晰、计算逻辑抽象、具备良好配置能力的新型建模与仿真开发方法，以适应多能系统灵

活应用场景部署前的功能验证。

为解决上述问题，在既有多能系统建模研究基础上，本文提出基于张量流的多能系统稳态仿真方法。通过梳理负荷侧多能系统业务模型的通用化描述要素，采用张量作为统一数据结构以表征各类状态及其依赖关系，规范化表征多介质状态量、网络关联与约束不变量，提升模型的标准化与复用性；进一步构建由周期、事件与数据等多机制驱动的张量流计算图，用于组织计算流程与数据传递，显式化依赖与触发关系，实现模型描述与求解实现的解耦，并支持并行计算与局部重算；配套封装方程组求解、优化求解等数学计算算子，给出面向仿真的张量流定义格式与装配规则，以配置化方式完成模型的装配与执行，降低跨场景迁移与部署成本，适配负荷侧多能系统多场景与多时空尺度的稳态仿真需求。

1　多能系统稳态仿真的张量流计算模型

1.1　稳态仿真问题的统一数学抽象

多能系统中可包含电、热/冷、天然气、氢能等多种能源介质，各类能源介质均可包含能源设备物理对象以及数据采集、控制等信息系统。在现有文献中，信息层通常被界定为覆盖数据通信、转换、存储、分析与控制等处理环节；但在具体建模讨论时，通常仅涉及数据采集与分析/控制部分[16]，相关理论对于实际工程实践中的信息系统边界尚未有明确定义。为实现对多能系统稳态仿真的通用化描述，将多能系统按业务、物理、信息模型表示为如图 1 所示的结构，其中的箭头表示数据流向，实线和虚线分别表示通常存在和可能不存在的数据流，红色与蓝色分别表示实时与非实时数据流。

将多能系统划分为物理系统、信息系统和业务系统后，需进一步识别三者之间的共性要素与相对不变项，以支撑统一稳态–动态仿真框架的功能实现。物理模型刻画物理对象所遵循的基本规律，尽管模型整体由具体设备与网络拓扑决定，但部分物理参数具有时变性，需通过参数估计算法在线修正。基于可采集的已知物理量、边界条件与已知参数，物理模型通过代数方程组或微分代数方程组求解得到未知状态变量。从计算视角看，在给定算法与输入样本的前提下，状态求解与参数更新均可视为确定性映射过程。

信息模型的基础部分包含数据采集、控制指令下发和数据存储功能，并在此基础上承载分析与控制计算功能。其核心数据处理可抽象为两类

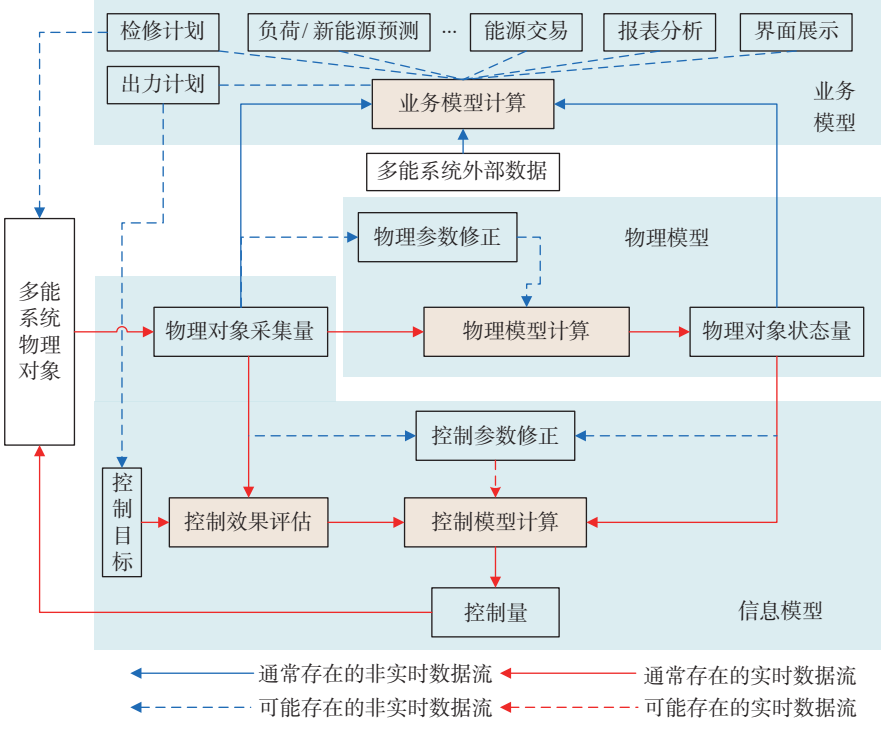

图 1　多能系统多层次计算模型结构图

Fig. 1　Structure diagram of multi-level computing model for multi-energy systems

数学映射：其一是指标构建与状态估计映射，即对原始与派生数据进行代数运算、统计聚合等操作，以得到用于评估与诊断的指标向量和系统状态；其二是控制决策与策略更新映射，即在既定目标与约束条件下，利用解析控制律、优化求解器或数据驱动近似方法，生成控制变量并更新策略参数。上述两类映射按既定的评估准则进行迭代，形成从数据到指标与状态、再到控制与策略的闭环计算过程。

业务模型包含设备检修计划、出力计划、负荷/新能源预测、能源交易、报表分析、界面展示等计划、能源数据应用和展示功能，其对多能物理系统运行的影响不具备信息系统那样的实时性，相关任务均属于标准计算：可表述为约束优化、统计/机器学习映射以及聚合/转换操作。

综上可以看出，在物理、信息和业务模型中，物理模型计算、控制效果评估、控制模型计算、业务模型计算等核心数据处理部分均可以抽象为某种数学计算过程。在数学计算中，内存中的数据可由计算程序内部控制，其外部数据源来自数据通信、文件、数据库等输入，因此，可以将非内存中的数据交互作为信息物理模型分界点，确定模型和数学计算过程的边界，模型外部均可视作环境。将数据源和计算过程中的各数据量采用统一数据结构进行表示，则可将信息物理进行通用化的描述，如图2所示。

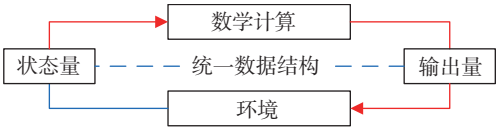

图2 信息物理通用描述结构

Fig. 2 General description structure of cyber-physical system

环境提供状态量输入，经过统一数据结构与数学计算后得到输出量，并形成对环境的反馈与更新。采用统一数据结构表示数据、统一计算结构表示数学计算过程，可将计算过程与软件定义相统一，实现具有更强灵活性和可扩展性的信息物理模型开发。

1.2 状态数据的统一张量表示

张量概念可由线性映射描述，可定义为坐标系改变时坐标转化关系的有序数组成的集合[17]，张量是矢量概念向高阶的推广，标量、矢量和矩阵分别可视作零阶、一阶和二阶张量。实际中所有物理量均可以用不同阶数的张量表示[18]，此外，张量的多维数组形式结构在机器学习等数据分析领域得到了广泛应用[19]。

利用张量的多维数组形式结构，通过拓展其中的数据类型，使其可包含浮点数、整数、字符串等不同类型数据，则通过张量的组合可表示出各类业务数据。将维数相同的张量组合在一起，通过添加名称标识不同的张量及其各维度长度，可表示出列表、哈希表、树、图等所有现有计算机数据结构，表1给出了一个用张量表示的树数据结构例子。

表1 张量表示的树数据结构

Tab. 1 Tree data structure represented by tensors

节点_4	父节点_4	节点值_4
A	—	1
B	***A***	2
C	***B***	3
D	***B***	4

为使该数据结构定义更严谨以利于外部实现对接，本文将其形式化定义为“列张量集”。该结构 $\boldsymbol{R}=(\boldsymbol{C}_1,\boldsymbol{C}_2,\cdots,\boldsymbol{C}_n)$ 是由 n 个一阶列张量组成的有序集合，所有 $\boldsymbol{C}_i$ 共享一个长度为 L 的记录轴，且每个 $\boldsymbol{C}_i$ 均须满足长度为 L 的约束，并具有确定的数据类型。每个 $\boldsymbol{C}_i$ 关联一个唯一的字段名 F_i，为便于接口校验，字段名 F_i 采用 Name_L 编码约定，其中“Name”表示字段的业务含义，“_L”显式约束该张量的记录轴长度。例如表1中“节点_4”，其业务含义为“节点”，并显式约束该张量的记录轴长度 L 为4。在树数据结构中，除根节点外其余节点均有且仅有一个父节点，因此采用节点和对应的父节点2个张量可完全表示出树的连接关系。上述以列数据表示张量，并通过名称表示张量含义和形状的数据结构，可作为统一结构表示多能系统各类业务的多种类数据，同时也可表示数学计算过程中的各状态数据。

1.3 基于张量流的计算图模型

当前广泛采用的面向对象程序设计强调“业务对象-方法”的一一对应[20]。在多能系统的计算中，这种方式面临显著局限：设备类型与组合关系高度多样，不同园区/台区的物理结构差异大，难以用固定的对象层级与方法集合长期覆盖；一旦物理系统或业务流程变动，就需要调整对象模型、属性与方法，带来较高的开发与维护成本、

可持续性不足。为解决这一通用性与演化性矛盾，本文从“状态–运算–传递”的角度重塑计算组织方式：以状态为基本元素，通过状态触发事件和状态操作，驱动状态在系统中流转与变换，从而完成从输入到输出的全过程数学计算。

为使上述过程具备可组合、可追溯、可演化的工程属性，本文将“状态”统一表示为张量，多能系统的稳态仿真过程可被精确地描述为一个张量流计算图。该计算图是一种有向无环图[21]结构，由节点和边组成。有向性规定了状态张量在各计算模块间的传递方向，无环性则让计算流程拥有清晰的起始与终止节点，可有效规避死循环问题，保障算法具备可计算性。

图 3 所示张量流是一种由节点和边组成的有向无环图，其中节点分为起始节点、中间节点和结束节点 3 类。起始节点通常用于从环境读取张量结构数据，中间节点可以有多条入边和出边，结束节点没有出边，为张量流中最后执行的一个节点。在节点中可对多条入边输入的不同结构张量进行运算，如方程组、优化模型求解、转置、排序、聚合计算等，并定义每条出边所输出的张量，边用于承载张量数据的传递。当张量流被触发后，从起始节点出发，依次执行各节点，直到结束节点，完成以状态张量为基本单元的数据计算和流动。

张量流表达计算过程时，尽管状态数据的来源、状态处理的时空范围可能改变，但其中状态流动的根本支撑不会改变，因此，可作为一种通用计算模型。

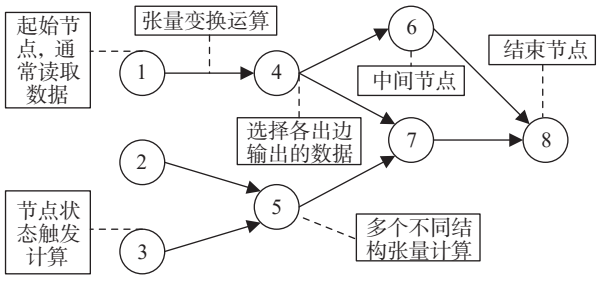

图 3　张量流示意图

Fig. 3　Tensor-flow diagram

2　面向多场景仿真的张量流实现框架

2.1　张量流计算图的配置化实现

负荷侧多能系统设备种类、业务需求多样，为避免不同场景均需修改程序代码的情况，通过张量流节点和边的组合设计数据流动规则、建立多个状态和对象之间的关系，以统一形式表达多能系统的模型与业务逻辑，从而在无需直接改动代码的前提下，实现基于配置的灵活装配与执行。

为了定义多能系统模型起作用的时空范围，在 1.3 节张量流结构基础上，定义模型计算过程的启动触发条件。在张量流的节点上设计张量流的触发方式，包括周期驱动、事件驱动、数据源驱动、手动驱动等各种可能方式，如表 2 所示，其中参数列描述选择各触发类型后需要配置的参数。

表 2　张量流触发类型

Tab. 2　Tensor-flow diagram

触发类型	名称	参数	说明
Simple repeat	周期驱动	时间周期	每隔一定时间周期,重复触发
Time drive	时间驱动	Cron表达式[22]	按照设定的时间触发
Event drive	事件驱动	事件判断表达式	当设定的事件规则满足时触发
Data source	数据源驱动	—	当数据源有变化时触发
Manual	手动驱动	—	手动触发

基于张量流结构对多能系统稳态仿真进行设计，对节点和边这两类张量流基本组成单元的功能配置方式分别进行定义。节点可分为数据源节点和张量计算节点两大类，其中张量计算节点可对多个不同结构的张量组进行操作，需包含矩阵计算、数学模型求解等多种计算能力，由此设计节点类型如表 3 所示。

根据表 3 和表 2，对节点计算内容和计算触发条件进行配置，即完成节点的功能定义。其中，线性/非线性方程组求解、线性/非线性规划、混合整数线性规划问题通常需调用求解器软件求解。不同求解器的调用接口格式不同，将输入量统一

表 3 张量流节点类型

Tab. 3 Node types of tensor-flow

节点类型	名称	输入量和参数	说明
Source	数据请求	数据源枚举	通过文件、数据库、URL、测点等数据源读取数据并生成张量
Tensor eval	张量计算	计算表达式	执行张量计算表达式
Solve	线性方程组求解	系数、常数对应张量	线性方程组求解
Nonlinear solve	非线性方程组求解	方程组公式、变量初值字符串	非线性方程组求解
Mixed integer linear programming	混合整数线性规划	目标系数、约束系数、约束上下限、变量类型、初值对应张量	混合整数线性规划
Nonlinear programming	非线性规划	目标函数、约束条件、变量初值字符串	非线性规划
None	无动作	—	无动作

采用张量后，在软件内部再将张量转化为求解器需要的输入参数，可简化模型求解的配置难度。非线性问题的约束与目标函数本身难以直接由固定结构张量显式封装，本文在拓展张量流的数据类型后，可通过输入非线性方程组、非线性规划模型的公式字符串，将其解析转化为求解器所需的数据格式，实现非线性问题的计算。

张量流的边实现节点与节点之间的连接和状态数据流转，在边上可配置选取首节点中相同结构的张量组作为数据源，并执行所需的计算操作，由此设计边的类型如表 4 所示。

在边中支持相同结构的张量组计算操作，包括取部分元素、转置、聚合计算、排序等单个张量的操作，此外，边中还支持开放神经网络交换、神经网络交换等人工智能模型，执行各类人工智能算法，以满足多能系统负荷/新能源预测、多能设备异常辨识等业务应用。

将多能系统稳态仿真业务分解为上述节点和边基本计算单元的功能配置，并组合成张量流计算图，可实现模型的配置化装配与一致化执行。

表 4 张量流边类型

Tab. 4 Edge types of tensor-flow

边类型	名称	说明
Eval	张量计算	支持幂运算、转置、聚合计算、排序等单个张量计算操作
Open neural network exchange	开放神经网络交换[23]	开放神经网络交换模型
Neuralnetwork exchange format	神经网络交换[24]	神经网络交换格式模型
⋮	⋮	⋮

2.2 张量流基础算子电力系统通用算子库

前述章节构建了基于张量流的多能系统稳态仿真框架，其核心思想是将复杂的物理过程与业务逻辑分解为一组标准化的数据流转与计算过程。该框架的有效性不仅体现在以张量作为统一的数据载体，更依赖于一套功能完备、可模块化组合的计算算子库。该算子库相当于面向电力与多能系统分析的领域特定语言的“词汇表”，为模型要素提供统一而精确的表达。借助这套语言，研究者能够以声明式方式构建计算图，聚焦于问题的物理本质与数学刻画，而无需卷入数值求解器调用、并行调度与内存管理等底层工程细节。

张量算子集是张量流计算图中的最小可组合单元，对应于图中节点或边所执行的原子级计算。这一算子库可视为算法实现的标准库，为上层方法的构建提供完备而一致的基础支撑。其核心能力之一是覆盖全面的线性代数运算，这是物理网络建模与分析的基石；从基本矩阵算术到高级运算，均提供数值稳定与形状安全的实现，以支持网络矩阵装配、模型线性化、灵敏度计算与稳健求解等常见需求，张量流基础算子如表 5 所示。

在基础算子集之上，可将这些功能单元组合成具有实际物理意义的算法模块。张量流框架的精髓在于，它将复杂的电力系统算法分解为一系列由基础算子构成的、具有明确数据依赖关系的有向无环图。这种表示方法不仅使算法流程可视

表 5　张量流基础算子

Tab. 5　Basic operators of tensor-flow

名称	算子类别	说明
matmul(A,B)	线性代数	矩阵乘法
solve(A,b)	线性代数	线性方程组求解
transpose(A)	线性代数	矩阵转置
eig(A)	线性代数	计算特征值与特征向量
$\boldsymbol{T}[i,j]$	张量操作	索引,访问特定参数
$\boldsymbol{T}[:,0]$	张量操作	切片,提取数据的某一整列
flip(T,d_{dims})	张量操作	沿指定维反转
reshape(T,s_{shape})	结构与形状	改变张量形状而不改内容
concat([$T1$,⋯,T_k],dim)	结构与形状	沿指定维度拼接多个张量
⋮	⋮	⋮

化，更重要的是实现了算法逻辑与具体实现的彻底分离。表 6 给出了电力系统核心概念经关键算子至张量流组件的映射关系。

2.3　支撑多场景仿真的关键技术

a. 计算引擎与问题建模解耦技术

面向多能系统的多环境仿真，关键在于降低建模与计算的耦合度，将问题模型与计算引擎解耦，使分析仅需聚焦于变量、约束与场景设定，而无需介入底层数学求解细节。如 2.2 节所述，在多能系统张量流计算中，需提供变量定义与赋值、逻辑运算、算术运算等基础的计算操作模块，以及可直接使用的线性/非线性方程组求解、混合整数线性规划、线性/非线性规划、人工智能算法等复杂数学运算操作模块。以张量为基本输入单元，用户仅需配置节点和边的类型，在列出数学模块表达式后即可获得计算结果，而无需编写程序实现模型的具体求解算法。实现这一点，需要对输入的数学模块公式和张量状态进行自动解析处理，生成计算算法接口所需的输入数据格式，特别地对于方程组和优化模型求解，需自动解析转化为对应开源或商业求解器接口所需输入数据，其中对于非线性问题，还需结合自动微分技术[25]自动计算雅可比矩阵和海森矩阵，避免开发者耗费大量精力和时间用于学习求解器的环境配置和接口调用方法。

b. 多个状态之间的关联处理

多能系统中不同状态之间相互关联的情况较为常见，例如能流状态分析需要用到拓扑状态，光伏发电预测状态需要用到天气预测状态，因此张量流需要具备多种触发机制支持，实现数据流动链路的及时性、正确性。本文所设计的多种张量流触发类型，可覆盖现有多能系统信息物理和业务需求，如表 2 所示。其中，通过数据源驱动的触发，可实现一个状态变化引起其他状态更新计算的机制。

表 6　电力系统通用算子

Tab. 6　Common operators for power systems

电力系统概念	关键算子	张量流表示
节点–支路关联矩阵	Source节点	由Branches张量派生出的一个稀疏二维张量$\boldsymbol{A}$
节点导纳矩阵	一个计算 $\boldsymbol{A}\times Y_{\text{branch}}\times\boldsymbol{A}^{\text{T}}$的子图	Transpose, Matmul, 元素级运算
直流潮流方程求解	线性方程组求解	系数、常数对应张量
牛顿–拉夫逊法迭代	一个包含雅可比矩阵计算、功率不平衡量计算和Solve 节点的迭代子图	Solve, Matmul, Sub, 以及用于计算雅可比矩阵元素的初等函数

c. 张量流的并行计算

张量流计算图中同一节点对应的各出边并行运算，在任一时刻，所有前驱节点均已执行完成的节点可被并行调度执行，据此可实现任务并行与流水并行相结合的调度策略。以图 4 的能流计算张量流为例，对并行执行序列进行说明：源节点为外部数据读取，可在触发器驱动下并行取数；当任一数据源更新时，由数据源触发类型仅重算其依赖子图，避免整体重新计算。由源数据得到 $\boldsymbol{A}_{\text{e}}$、$\boldsymbol{Y}_{\text{b}}$、$\boldsymbol{A}_{\text{h}}$、$\boldsymbol{M}_{\text{b}}$、$\boldsymbol{M}_{\text{n}}$ 等结构化派生量，这些节点之间无数据相关时可并行执行。电网子图与热网子图在图结构上彼此独立，可并行求解至各自末端，最终在汇合节点进行跨能耦合计算。

3　算例分析

本节对同一多能系统通过不同的张量流配置，分别实现能流计算与优化调度两种不同场景的稳态仿真，验证基于张量流的多能系统多场景稳态仿真的有效性。

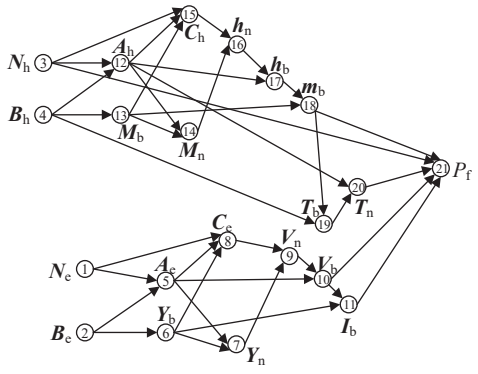

图 4 能流计算的张量计算图

Fig. 4 Tensor computation graph for energy-flow calculation

3.1 张量流实现多能流计算

为验证所提张量流稳态仿真方法的有效性，本文选取吉林地区典型用户侧综合能源系统配置，考虑由直流微电网与供热网络构成的多能系统，如图 5 所示。其中，节点 0 为微电网与电网连接节点，节点 5 为燃料电池热电联产装置节点，该节点将微电网与供热网络相耦合。

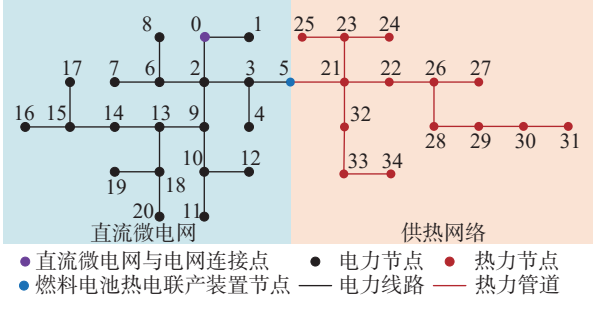

图 5 电–热能源系统结构

Fig. 5 Structure of electric-thermal energy system

直流微电网的模型基于基尔霍夫电流定律、基尔霍夫电压定律和支路伏安特性构建，如：

$$\begin{cases} \boldsymbol{A}_{\mathrm{e}}\boldsymbol{I}_{\mathrm{b}} = \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{V}_{\mathrm{b}} = \boldsymbol{A}_{\mathrm{e}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{V}_{\mathrm{n}} \\ \boldsymbol{I}_{\mathrm{b}} - \boldsymbol{I}_{\mathrm{s}} = \boldsymbol{Y}_{\mathrm{b}}(\boldsymbol{V}_{\mathrm{b}} - \boldsymbol{V}_{\mathrm{s}}) \end{cases} \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{A}_{\mathrm{e}}$ 为微电网节点支路关联矩阵；$\boldsymbol{I}_{\mathrm{b}}$ 为支路电流向量；$\boldsymbol{I}_{\mathrm{s}}$ 为支路电流源电流向量；$\boldsymbol{V}_{\mathrm{b}}$ 为支路电压降向量；$\boldsymbol{V}_{\mathrm{n}}$ 为节点电压向量；$\boldsymbol{V}_{\mathrm{s}}$ 为支路电压源电压向量；$\boldsymbol{Y}_{\mathrm{b}}$ 为以各支路电导为对角元的对角矩阵。

直流微电网与电网连接点的电压相对稳定，该节点对地支路可采用电压源表示，直流负荷可采用节点对地支路上的电流源表示。将式 (1) 中的支路电流和电压差变量消去，可得式 (2) 所示节点电压方程：

$$\boldsymbol{A}_{\mathrm{e}}\boldsymbol{Y}_{\mathrm{b}}\boldsymbol{A}_{\mathrm{e}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{V}_{\mathrm{n}} = \boldsymbol{A}_{\mathrm{e}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Y}_{\mathrm{b}}\boldsymbol{V}_{\mathrm{s}} - \boldsymbol{A}_{\mathrm{e}}\boldsymbol{I}_{\mathrm{s}} \tag{2}$$

供热网络模型包含水力模型和热力模型[26]，如式 (3) 所示：

$$\begin{cases} \boldsymbol{A}_{\mathrm{h}}\boldsymbol{m}_{\mathrm{b}} = \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{h}_{\mathrm{b}} = \boldsymbol{A}_{\mathrm{h}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{h}_{\mathrm{n}} \\ \boldsymbol{m}_{\mathrm{b}} = \dfrac{128\mu}{\pi\rho g}\boldsymbol{L}_{\mathrm{b}}\boldsymbol{D}_{\mathrm{b}}^{-4}\boldsymbol{h}_{\mathrm{b}} \\ C\boldsymbol{T}_{\mathrm{b}}\boldsymbol{m}_{\mathrm{b}} = \lambda\boldsymbol{L}_{\mathrm{b}} \\ \left(\sum_k m_{\mathrm{o},k}\right)T_{\mathrm{o},k} = \sum_k (m_{\mathrm{i},k}T_{\mathrm{i},k}) \end{cases} \tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{A}_{\mathrm{h}}$ 为供热网络节点支路关联矩阵；$\boldsymbol{m}_{\mathrm{b}}$ 为支路热媒流率向量；$\boldsymbol{h}_{\mathrm{b}}$ 为支路压头损失向量；$\boldsymbol{h}_{\mathrm{n}}$ 为节点压力向量；热网压降计算基于 Darcy-Weisbach 方程，$\boldsymbol{L}_{\mathrm{b}}$ 和 $\boldsymbol{D}_{\mathrm{b}}$ 分别为支路管道长度和直径向量；μ 为流量黏度，取 0.294×10^{-6}；ρ 为热媒密度；g 为重力加速度；C 为热媒比热容；$\boldsymbol{T}_{\mathrm{b}}$ 为以各支路两端温差为对角元的对角矩阵；λ 为管道导热系数，本文取 20；$m_{\mathrm{i},k}$ 和 $m_{\mathrm{o},k}$ 分别为流入和流出节点的热媒流量；$T_{\mathrm{i},k}$ 和 $T_{\mathrm{o},k}$ 分别为流入和流出节点的热媒温度。

在燃料电池热电联产装置所在节点，为简化仿真分析，本文假设电热转化效率和热电转化系数均为 1，节点满足产热功率近似等于节点耗电功率与燃料电池输出功率之和：

$$Cm_{\mathrm{f}}(T_{\mathrm{fo}} - T_{\mathrm{fi}}) = P_{\mathrm{f}} - V_{\mathrm{f}}I_{\mathrm{f}} \tag{4}$$

式中：m_{f} 为燃料电池节点热媒流率；T_{fo} 和 T_{fi} 分别为流入和流出燃料电池节点的热媒温度；V_{f} 和 I_{f} 分别为燃料电池节点的电压和向直流微电网的注入电流；P_{f} 为燃料电池输出功率。

采用所提张量流配置方式实现以上多能流计算模型，能流计算张量流如图 4 所示，其中：$\boldsymbol{N}_{\mathrm{e}}$、$\boldsymbol{B}_{\mathrm{e}}$、$\boldsymbol{N}_{\mathrm{h}}$ 和 $\boldsymbol{B}_{\mathrm{h}}$ 为电网节点、电网支路、热网节点、热网支路输入数据；C_{e} 和 C_{h} 分别为节点电压方程和水力方程中的常量；$\boldsymbol{M}_{\mathrm{b}}$ 为以 $128\mu\boldsymbol{L}_{\mathrm{b}}\boldsymbol{D}_{\mathrm{b}}^{-4}/\pi\rho g$ 为对角元的对角矩阵；$\boldsymbol{M}_{\mathrm{n}}=\boldsymbol{A}_{\mathrm{h}}\boldsymbol{M}_{\mathrm{b}}\boldsymbol{A}_{\mathrm{h}}^{\mathrm{T}}$，结束节点 21，是张量流计算图最终的 21 号节点。

数据源节点输入的数据如表 7 和表 8 所示。其中，NodeId、Is、Vs、ms 和 Tb 分别为节点编号、注入电流、电压、热负荷流量和回热温度，SourceNode、TargetNode、Rk、L 和 D 分别为支路首节点编号、尾节点编号、电阻、长度和直径。上述节点与支路数据基于典型多能系统运行特性

表 7　多能系统节点数据张量

Tab. 7　Tensors of multi-energy system nodes

电网节点张量			热网节点张量		
NodeId_21	Is_21	Vs_21	NodeId_15	ms_15	Tb_15
0	0	1 000	0	0	75
1	70	0	1	0.478	50
2	0	0	2	0.41	48
3	96	0	3	0.382	47
4	4	0	4	0.246	45
5	36	0	5	0.273	46
6	0	0	6	0.300	47
7	32	0	7	0.164	44
8	130	0	8	0.218	45
9	0	0	9	0.191	46
10	45	0	10	0.164	45
11	68	0	11	0.109	43
12	47.5	0	12	0.191	46
13	0	0	13	0.137	45
14	22	—	14	0.1093	44
15	23	—	—	—	—
16	73	—	—	—	—
17	34	—	—	—	—
18	9	—	—	—	—
19	46	—	—	—	—
20	21	—	—	—	—

表 8　多能系统支路数据张量

Tab. 8　Tensors of multi-energy system branches

电网支路张量			热网支路张量			
Source Node_20	Target Node_20	Rk_20	Source Node_14	Target Node_14	L_14	D_14
0	1	0.053	0	1	20	0.06
0	2	0.054	1	3	20	0.05
2	3	0.054	3	5	15	0.04
3	4	0.063	3	4	15	0.04
3	5	0.051	1	2	20	0.05
2	6	0.037	2	6	25	0.05
6	7	0.079	6	7	15	0.04
6	8	0.072	6	8	20	0.05
2	9	0.053	8	9	20	0.05
9	10	0.038	9	10	20	0.05
10	11	0.079	10	11	20	0.05
10	12	0.078	1	12	25	0.05
9	13	0.083	12	13	20	0.05
13	14	0.065	13	14	15	0.04
14	15	0.064	—	—	—	—
15	16	0.074	—	—	—	—
15	17	0.081	—	—	—	—
13	18	0.078	—	—	—	—
18	19	0.084	—	—	—	—
18	20	0.082	—	—	—	—

设定，采用仿真数据进行计算分析。

运行张量流，得到多能流计算结果如图 6 所示。直流微电网部分以紫色数字表示节点电压、蓝色数字表示支路电流；供热网络部分以红色数字表示节点温度、绿色数字表示支路流量。

在图 6 中可以验证流入和流出各节点的功率和热流平衡，该潮流计算过程可以和软件定义天然对齐：将状态变量统一用张量表示，并把求解电网/热网方程等步骤抽象为张量流计算图中的节点–边组合；节点承载方程组/优化等集中运算，边负责转置、聚合、筛选等变换。在此框架下，计算触发由配置驱动(如数据源变更、定时或事件规则)，模型与求解器接口解耦，拓扑与运行参数仅通过更换输入张量即可实现迁移重用。由此，能流计算不再依赖场景特定的硬编码实现，而是以配置化的张量流过程完成，便于跨场景复用与快速调试。

根据张量流有向无环的特性，从任一中间节点向前查找，与其连通的所有节点和边可构成一个完整的张量流。因此以张量流形式定义多能流计算算法，在运行时可选择将某一中间节点作为结束节点，运行整个张量流的一部分，如图 7 所示。为直观体现本文所提方法的工程应用性，开发了相应的原型软件，图 7 所示即为在软件中选择中间节点运行并查看结果的实际界面。

在张量流中，可自由选择中间节点运行和查看该节点的计算结果，便于算法配置问题的定位和调试。

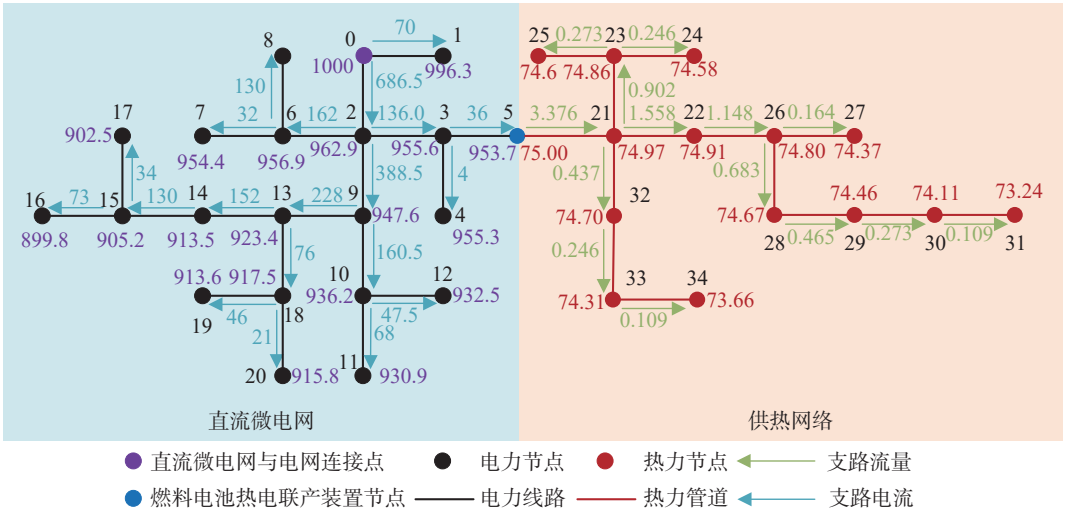

图 6 能流计算结果

Fig. 6 Calculation results of energy-flow

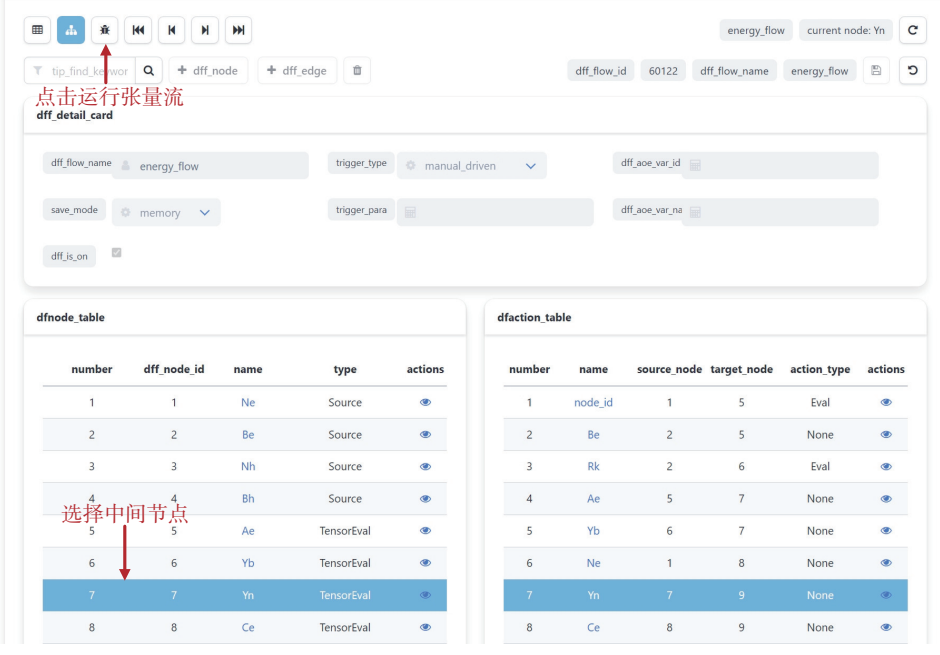

图 7 选择中间节点运行张量流

Fig. 7 Running tensor-flow by selecting intermediate nodes

3.2 张量流实现多能优化调度

本小节仍以图 5 所示多能系统为例，考虑能源价格和能流平衡、设备运行约束条件，以用能成本最小为目标建立多能优化调度模型：

$$\min(c_{\mathrm{g}}P_{\mathrm{g}}+c_{\mathrm{H}}P_{\mathrm{H}})$$

$$\text{s.t.}\begin{cases}\sum_i P_{\mathrm{e},i}+\sum_j P_{\mathrm{h},j}=P_{\mathrm{g}}+P_{\mathrm{H}}\\ \sum_j P_{\mathrm{h},j}-P_{\mathrm{H}}\leqslant P_{\mathrm{L,max}}\\ 0\leqslant P_{\mathrm{H}}\leqslant P_{\mathrm{H,max}}\end{cases}\tag{5}$$

式中：c_{g} 为电价；P_{g} 为电网注入直流微电网的功率；c_{H} 为燃料价格；P_{H} 和 $P_{\mathrm{H,max}}$ 分别为燃料电池热电联产装置产热功率和最大产热功率；$P_{\mathrm{e},i}$ 为节点 i 电负荷；$P_{\mathrm{h},j}$ 为节点 j 热负荷；$P_{\mathrm{L,max}}$ 为燃料电池热电联产装置的最大电转热功率。

基于式 (5) 在软件页面配置张量流如图 8 所示，其中节点 1～4 为数据源节点，数据源类型为测点，即系统负荷和能源价格通过测点量测获取，节点 5 中生成目标函数对应张量，节点 6 中生成约束条件对应张量，节点 7 类型为混合整数

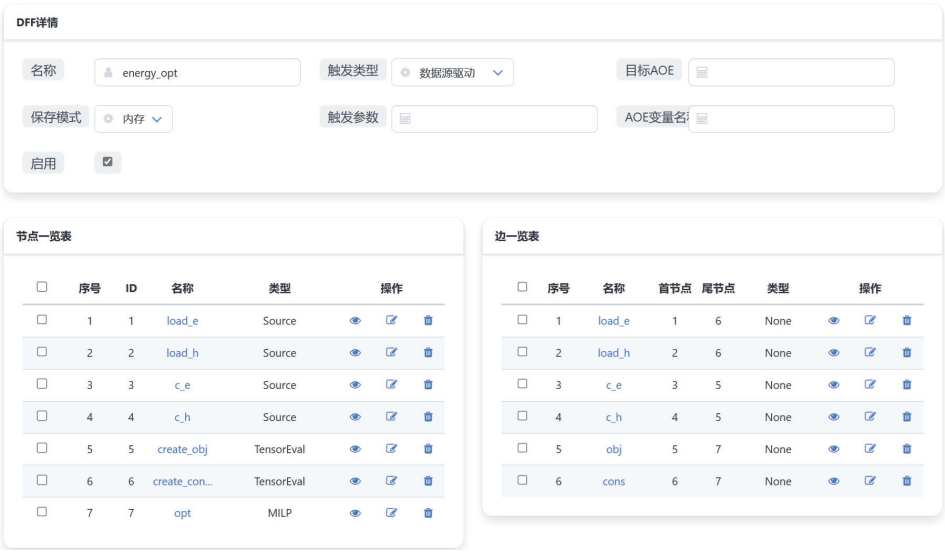

图 8　多能优化配置

Fig. 8　Multi-energy optimization configuration

线性规划，对优化模型进行求解。该张量流的触发类型设置为数据源驱动，即当系统负荷或能源价格发生变化时触发优化计算。

实时运行上述张量流对多能系统进行控制，得到多能优化调度结果如图 9 所示，其中：时段 0～55 电价为 0.8373 元/(kW·h)，时段 56～95 电价为 0.334 3 元/(kW·h)，燃料价格为 0.465 元/(kW·h)。

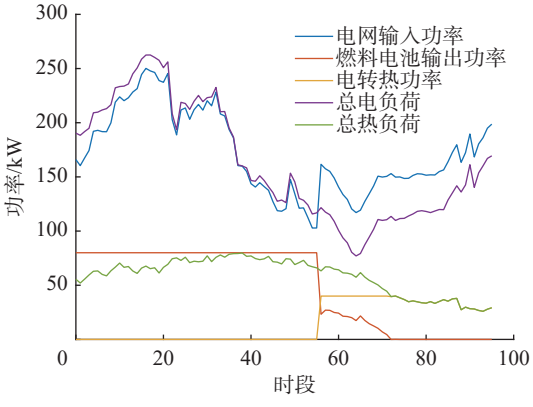

图 9　多能优化结果

Fig. 9　Multi-energy optimization results

由图 9 可以看出，在时段 0～55 内，电价高于燃料价格，燃料电池以 80 kW 最大功率输出，热力负荷全部由燃料电池供给；在时段 56～95 内，电价低于燃料价格，系统优先依靠电网满足用能需求。受热电联产装置电转热功率上限 40 kW 约束，在时段 56～73 内，燃料电池仍维持供热输出；自时段 74 起，燃料电池供热功率降至 0，热负荷完全由电转热单元承担。优化结果与预期规律一致。在该优化策略下，系统 96 个时段的总用能成本为 12 929.78 元。

为量化评估所提方法的实现与运行优势，在功能、求解器与硬件/软件环境一致的前提下，将张量流配置化实现与传统面向对象 Java 实现进行对比。

a. 代码量与开发效率：传统实现需要同时掌握语言特性与稀疏矩阵/优化库的接口调用与内存管理，且能流计算与优化调度往往分别编写业务逻辑与求解流程；在统一口径下，完成上述两类功能的新增代码量约 350～450 行。所提方法将求解与模型解耦，通过“节点–边–张量维度”的配置化方式装配数据读取、矩阵运算与结果输出的全流程，只需进行算子库代码的一次性编写后，再如图 8 进行节点与边的类型与算子配置即可，后续无需编写重复算子，降低了开发门槛。

b. 计算性能：在 Intel(R) Core(TM) i9-14900 CPU, 32.0 GB 硬件环境下执行计算，以时段 96 的能流计算为例给出量化对比，传统面向对象 Java 方法求解器计算阶段总用时为 0.429 8 s，累计 CPU 占用时间为 0.562 5 s，而本文张量流框架软件调用相同的优化求解器，求解阶段平均用时为 0.437 2 s，配置解析与计算图构建平均用时约为 0.01 s，累计 CPU 占用约 0.57 s。结果表明，虽然面向对象方法通过精细优化可实现较高性能，但本文方法通过调用优化的计算引擎，其计算效率主要取决于这些底层模块的性能。对于复杂问题，核心计算耗时占主导，配置解析的开销相对较小，因此，可以达到与专用代码相当的计算效率。

c. 灵活性与可维护性：模型的调整和扩展主要通过修改张量流配置实现，降低了模块间的耦合度，提高了系统的灵活性和可维护性。

以上两个算例通过张量流节点和边的“搭积木”方式软件定义实现多能流计算和多能优化调度计算流程，验证了所提方法的有效性。

4 结 语

本文提出了一种基于张量流的多能系统多场景稳态仿真方法，给出了统一的张量表示、计算图流程与触发执行机制，并结合能流与优化算例验证有效性。结果表明：

a. 通过明确多能系统物理、信息和业务模型边界，建立了多能系统稳态仿真的张量流计算模型，在此基础上将多能系统稳态仿真过程分解为张量流的节点和边基本计算单元的配置组合，构建有向无环计算图，避免针对不同场景均需修改程序，实现了电热耦合场景的通用化建模与复用。

b. 基于张量流统一表示多能系统业务计算过程中的状态流转，通过计算引擎与问题建模解耦、多状态关联触发及闭环控制等设计，提升了多能系统多场景稳态仿真中不变部分的复用性。该方法将新增场景的实现从代码编写转变为配置化装配，且配置解析的额外开销远低于核心计算耗时，从而降低了多场景下开发配置的难度，适用于负荷侧多能系统灵活多变的应用需求。

所提方法为多能系统提供了贴近工程需求的软件开发解决方案，以灵活简易的方式实现多能系统信息物理业务功能，未来将针对不同场景研究更多可直接调用的计算单元模块，进一步提升开发效率。

参考文献：

[1] 司方远, 张宁, 韩英华, 等. 面向多元灵活资源聚合的区域综合能源系统主动调节能力评估与优化: 关键问题与研究架构 [J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(6): 2097−2118.

[2] Fang F, Yu S Y, Xin X L. Data-driven-based stochastic robust optimization for a virtual power plant with multiple uncertainties[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(1): 456−466.

[3] 李承周, 王宁玲, 窦潇潇, 等. 多能源互补分布式能源系统集成研究综述及展望 [J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(18): 7127−7149.

[4] 崔杨, 郭福音, 仲悟之, 等. 多重不确定性环境下的综合能源系统区间多目标优化调度 [J]. 电网技术, 2022, 46(8): 2964−2974.

[5] 刘学智, 张沛超, 严正. 第 5 代区域供热供冷驱动的产消型综合能源系统多能流分析 [J]. 电力系统自动化, 2023, 47(4): 78−90.

[6] Li S C, Cao D, Hu W H, et al. Multi-energy management of interconnected multi-microgrid system using multi-agent deep reinforcement learning[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2023, 11(5): 1606−1617.

[7] Huang W J, Du E S, Capuder T, et al. Reliability and vulnerability assessment of multi-energy systems: an energy hub based method[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(5): 3948−3959.

[8] 陈晨, 董平先, 宋晓帆, 等. 基于物理能力的逻辑模型结构设计及孪生建模应用研究 [J]. 电力信息与通信技术, 2023, 21(4): 1−8.

[9] 施烨, 金浩, 郝飞, 等. 一种多能互补系统优化调度通用化建模方法 [J]. 电网技术, 2022, 46(12): 4924−4937.

[10] 江昊, 黄诗岩, 张庚. 信息网−电网−交通网模型构建与故障传播研究 [J]. 电力信息与通信技术, 2021, 19(9): 15−23.

[11] Mancarella P. MES (multi-energy systems): an overview of concepts and evaluation models[J]. Energy, 2014, 65: 1−17.

[12] Zeng Q, Fang J K, Li J H, et al. Steady-state analysis of the integrated natural gas and electric power system with bi-directional energy conversion[J]. Applied Energy, 2016, 184: 1483−1492.

[13] Liu H, Liu X S, Cai C, et al. A new power flow model for combined heat and electricity analysis in an integrated energy system[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 219: 119597.

[14] Mohammadi M, Noorollahi Y, Mohammadi-Ivatloo B, et al. Energy hub: from a model to a concept—a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 80: 1512−1527.

[15] Barbierato L, Mazzarino P R, Montarolo M, et al. A comparison study of co-simulation frameworks for multi-energy systems: the scalability problem[J]. Energy Informatics, 2022, 5(4): 53.

[16] Zhou M, Liu C S, Jahromi A A, et al. Revealing vulnerability of N-1 secure power systems to coordinated

cyber-physical attacks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(2): 1044−1057.

[17] 宋来忠. 张量分析及其应用 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2016: 1–13.

[18] 张志镇, 程红梅, 邢燕, 等. 《张量分析》课程教学趋势分析与改革构想 [J]. 教育教学论坛, 2018(47): 91−92.

[19] 庄毅敏, 文渊博, 李威, 等. 面向机器学习系统的张量中间表示 [J]. 中国科学: 信息科学, 2022, 52(6): 1040−1052.

[20] 凯·S. 霍斯特曼. Java 核心技术 卷 I[M]. 林琪, 苏钰涵, 译. 北京: 机械工业出版社, 2020: 92–154.

[21] Pan R S, Wang Z Y, Wei Y T, et al. Towards efficient visual simplification of computational graphs in deep neural networks[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2024, 30(7): 3359−3373.

[22] 刘艳涛. Linux Shell 命令行及脚本编程实例详解 [M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2024: 91–95.

[23] Kim S Y, Lee J, Kim C H, et al. Extending the ONNX runtime framework for the processing-in-memory execution[C]//Proceedings of the 2022 International Conference on Electronics, Information, and Communication (ICEIC). Jeju: IEEE, 2022: 1–4.

[24] Lee K H, Park J, Kim S T, et al. Design of neural network model converting framework based on NNEF[C]// Proceedings of the 2022 13th International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC). Jeju: IEEE, 2022: 1741–1743.

[25] Margossian C C. A review of automatic differentiation and its efficient implementation[J]. WIREs Data Mining and Knowledge Discovery, 2019, 9(4): e1305.

[26] 于东立. 考虑线性网络约束的热−电多能流系统建模与最优能流分析 [D]. 北京: 华北电力大学 (北京), 2019: 8–15.

（编辑：毕莉明）