arXiv:2305.05652v1 [eess.SY] 9 May 2023

面向协同作用增强与电网响应的综合能源系统分布式经济预测控制：一种分解与协作策略

Long Wu[a,b], Xunyuan Yin[c], Lei Pan[a,*], Jinfeng Liu[b,*]

[a] 发电控制与安全国家工程研究中心，东南大学能源与环境学院，中国南京，210096[b] 阿尔伯塔大学化学与材料工程系，加拿大阿尔伯塔省埃德蒙顿，T6G 1H9[c] 南洋理工大学化学、化学工程与生物技术学院，新加坡南洋道62号，637459

摘要

越来越多运行单元紧密集成到综合能源系统（IES）中，导致这些单元之间形成复杂的互联关系。强烈的动态交互作用给设计成功的分布式协调控制器带来障碍，使其难以实现各单元之间的协同作用并释放电网响应潜力。为应对这些挑战，我们引入一种基于增广雅可比矩阵的综合能源系统有向图表示，以描述其潜在的动态拓扑结构。利用这一表示，我们提出一种通用的子系统分解方法：根据动态时间尺度对整个综合能源系统进行纵向分解，并根据运行单元之间的互连紧密度进行横向分解。基于分解后的子系统，我们开发了一种具有多个全局目标的协作式分布式经济模型预测控制（DEMPC），用于按照电网请求调节发电功率，并满足客户的冷却需求和系统的经济要求。在该DEMPC中，多个局部决策代理按顺序迭代协作，以发挥各运行单元的潜力，实现全系统动态协同。此外，我们还讨论了子系统分解对综合能源系统分布式协作方案设计的影响，并针对复杂能源系统的优化分解提供了面向控制的基本指南。大量仿真结果表明，采用不同分解和协作程度的控制策略会使综合能源系统的整体性能产生显著差异。基于所提出子系统配置的标准控制方案，其性能比基于经验分解的控制基准高约20%。与该基准相比，DEMPC架构可进一步将综合能源系统的整体性能提高约55%。

*通讯作者：L. Pan。电子邮箱：panlei@seu.edu.cn；J. Liu。电话：+1-780-492-1317。传真：+1-780-492-2881。电子邮箱：jinfeng@ualberta.ca

关键词：多能/综合能源系统；实时协调；有向图；纵向-横向分解；分布式协作；模型预测控制。

1 引言

随着先进混合能源电网技术的快速发展，为实现更高的能源效率并降低环境成本，多能源系统集成日益普及 [1,2]。由于能量生产和消费方式更加灵活，具有紧密互联能源子系统的综合能源系统（IES）已成为传统单输入输出能源系统的一种有前景的替代方案 [1, 3]。综合能源系统通常作为产消者运行，由客户和各种运行单元组成，例如建筑物、可再生能源发电设施、发电机、冷水机组、供热单元、储能设施及其他辅助单元。这些单元通过物质流、信息流和能量流紧密集成，形成了复杂的过程网络。尽管综合能源系统在理论上具有节能高效、运行灵活的特性，但将具有不同动态特性的单元深度集成到统一网络中，也带来了涉及动态特性和协调控制的复杂问题 [2, 4, 5]。

随着间歇性可再生能源不断涌入电网，住宅、商业和工业领域对电网响应和需求响应的关注日益增加 [6–8]。这些措施旨在实时实现电力供需平衡，提高电网的可靠性和灵活性，以及运营商的风险管理能力 [9]。其中，作为潜在参与者的电网响应型建筑能源系统已得到广泛研究。一方面，建筑能源系统凭借其需求灵活性，可以主动与智能电网互动，促进电力平衡 [10]。另一方面，建筑能源系统还可以根据电网的要求提供调频和需求响应服务 [11]。即使装机容量较小的系统，也能通过聚合器向电网运营商提供电网响应/需求响应及辅助服务，发挥重要作用 [12]。这也为这些参与者带来了额外的盈利机会 [13]。

在这一能源背景下，将具有不同功能的运行单元整合到一个涵盖供需两侧的统一系统中，使综合能源系统成为电网响应的理想选择[14,15]。现有关于综合能源系统的研究主要聚焦于基于稳态优化的调度。多时间尺度滚动优化方法已用于综合能源系统调度，以增强系统鲁棒性并匹配多阶段能源市场 [16, 17]。近期研究 [18, 19],考虑了微型燃气轮机的动态惯性，以提升系统响应能力。鉴于综合能源系统为客户提供多种能源，研究也探讨了如何平衡对不同能源需求的响应，即综合需求响应 [20, 21]。

对综合能源系统调度的研究通常假设运行单元能够很好地跟踪给定参考值。然而，由于综合能源系统中存在复杂的动态交互作用，这对实时控制系统提出了很高的要求 [22,23]。尽管如此，关于综合能源系统在秒至分钟时间尺度内的详细动态特性与实时控制，鲜有研究报道。近期，Wu 等人探讨了综合能源系统的完整动态特性，并提出了一种基于经济模型预测控制的多时间尺度框架，用于运行电力—冷却综合能源系统；该框架依据动态响应将系统分解为三层 [24]。Jin 等人开发了一种线性分布式跟踪模型预测控制（MPC），通过将系统划分为电力和供热子系统，调节由微型燃气轮机和热泵组成的离网电—热系统 [25]。Lei 等人将热电联产系统划分为供热和电力两部分，并设计了一种双层控制方案：上层负责供热控制，下层负责电力控制 [26]。Wu 等人 [24] 和 Jin 等人 [25] 的研究表明，综合能源系统具有多个动态响应时间尺度，即动态时间尺度多重性；在实施基于优化的控制方案时，这可能导致控制问题病态 [27]。此外，Zhang 等人 [28] 和 Paiva 等人 [29] 分别研究了可控混合系统提供电网响应时的动态性能，重点关注基于燃料电池和燃气轮机的系统，以及基于可再生能源的系统。值得注意的是，与这些混合系统类似，综合能源系统中的运行单元通常具有动态互补性 [24]。这一特性使综合能源系统具备巨大潜力，能够针对公用电网的非计划功率需求精确控制发电。然而，由于提供响应的深度越大，系统不确定性越强 [30,31], ，参与公用电网响应的综合能源系统必须提升协调所有单元的能力，才能在满足系统经济性和本地客户能源需求的同时释放这一潜力。由于动态和结构复杂且变量众多，传统的集中式方案不适用于综合能源系统的实时控制 [24, 25, 32]。因此，亟需一种有效的控制策略，以分布式方式协调各单元的动态行为。然而，针对复杂综合能源系统的分布式协调控制研究仍然较少，尚未充分释放其快速响应潜力。

为应对新兴能源系统中日益增加的结构复杂性和大量决策变量，分布式和去中心化控制架构正变得越来越普遍 [5, 33]。太阳能与风能混合系统作为实际的分布式能源系统，已得到广泛研究。Qi 等人 [34] 提出了一种分布式模型预测控制方法，用于控制太阳能和风能子系统； [35]报道的类似方法也采用了该方法。在电力—供热系统的分层策略中，Hu 等人 [36] 为底层的每个单元设计了一种分布式模型预测控制

器。此外，分布式方案也已应用于供暖、通风和空调（HVAC）系统。Rawlings 等人 [37] 和 Bay 等人 [10] 为多建筑物系统开发了分布式模型预测控制器，以维持各建筑物相应的室内温度。Kuboth 等人 [38] 提出了一种并行分布式模型预测控制策略，用于控制混合 HVAC 系统中的供暖和供水子系统。Yang 等人 [39]提出了一种两层模型预测控制方法，分别用于优化多区域建筑物的照明负荷和室内温度。此外，De Lorenzi 等人 [31]为一套包含多栋建筑物的电力与供热系统中的每个单元设计了监督式模型预测控制器，以提供需求响应。Tang 等人设计了一种监督式模型预测控制器，用于 HVAC 系统中的冷水机组和蓄冷装置，以实现需求响应 [40]。 [41]也报告了一种类似的监督控制器，用于调节混合发电系统中的微型燃气轮机、光伏和电池。许多能源系统研究普遍忽视了一个关键问题：适当的子系统分解是成功实现非集中式优化框架的先决条件和基本要素 [42]。在以往的研究中，系统通常依据各运行单元的结构边界 [31,35,36] ，或依据各单元供应或消耗的能源类型 [25, 26]进行分解。除了这些显式的单元间连接，系统还存在由输入、扰动、状态和输出等动态变量引起的隐式底层单元间及单元内部连接。然而，现有的大多数能源系统控制研究往往忽略了这一事实。对于相对简单的能源系统，这类疏漏或许可以接受；但对于动态过程中涉及复杂单元间及单元内部连接的综合能源系统，则可能造成问题。基于显式单元间连接进行分解，可能导致子系统配置不当，使子系统间互联关系仍然稠密，或子系统内部的交互作用变得稀疏 [43]。由于分布式控制器依赖多个本地决策智能体协调行动，此类子系统分解不足可能导致鲁棒性下降和动态性能恶化 [44, 45]。因此，在非集中式控制框架下，实现单元间协同作用，并发挥综合能源系统作为统一系统进行响应的潜力，将颇具挑战。尽管存在这些问题，复杂能源系统的系统化子系统分解方法仍鲜有研究，尤其是考虑到时间尺度多重性和动态互联性所带来的双重复杂性。

模型预测控制（MPC）凭借其预测与校正机制，在能源系统的众多控制技术中日益受到青睐 [46]。除上述相关工作外，研究人员还设计了 MPC，用于多区域建筑物聚合商的最优运行、[47], 建筑物储能系统的最优运行 [48], ，以及配备聚光太阳能系统的暖通空调系统的最优运行[49]。此外，研究人员还探讨了 MPC 在区域供热/冷却网络和建筑物系统需求响应中的应用 [50, 51]。值得注意的是，一种新型非线性

具有全局经济目标的 MPC，即经济模型预测控制（EMPC），被认为是智能制造领域的一种灵活的最优控制工具 [22]。与传统的跟踪型模型预测控制不同，EMPC 在优化流程运行方面具有很大的灵活性，从而实现系统级协调 [23, 52]。EMPC 在能源领域的初步探索已应用于发电站 [53]，、微电网 [54]，和综合能源系统 [24] 的管理。尽管 MPC 在能源系统管理方面取得了成功，但在为综合能源系统开发分布式 EMPC、以实现所有运行单元之间的动态协同作用时，分解后的子系统将如何影响分布式架构的设计，仍不清楚。

基于这些观察可以发现，综合能源系统需要一种有效的实时控制策略，以协调具有不同动态特性的所有运行单元。然而，针对这一方面的研究仍然有限。由于决策变量众多、系统结构复杂且存在多时间尺度，直接将基于优化的控制方案应用于综合能源系统，会导致显著的计算负担、鲁棒性降低以及优化问题病态 [32]，[45]，[27]。一种可行的替代方案是将综合能源系统划分为若干较小的子系统，再设计分布式框架，以模块化方式控制该系统。在此框架下，子系统配置不当会对综合能源系统的控制性能产生负面影响 [42]。因此，需要一种通用的子系统分解方法，以有效处理综合能源系统动态特性与结构中存在的多时间尺度和复杂互联关系。然而，目前综合能源系统缺乏可靠的分解方法，无法确定有助于设计分布式协作方案的最优子系统配置。此外，如何利用所有分解后的子系统，同时满足电力、供冷/供热和盈利能力方面的运行需求，仍未得到解决。

为了解决上述问题并实现动态最优的模块化管理，本文提出了一种垂直-水平子系统分解方法，以及一种面向综合能源系统（IESs）的合作式分布式经济模型预测控制（DEMPC）方法。本文选取一个用于供电和供冷的并网综合能源系统作为研究对象。首先，将综合能源系统描述为由节点和单向边组成的有向图，以揭示其动态变量拓扑结构。随后，基于雅可比矩阵构建邻接矩阵，从数学角度表示该有向图。在此基础上，本文提出一种面向控制的方法，将整个综合能源系统分解为规模更小的子系统。该方法采用时间尺度分离方法对系统进行垂直分解，并基于运行单元之间的互联关系，利用社区检测技术进行水平分解。分解后的子系统在各自内部表现出一致的动态响应和较强的交互作用，而不同子系统之间则表现出不同的动态响应和较弱的交互作用。

因此，该方法能够同时解决综合能源系统中的多时间尺度和结构复杂性问题。接下来，利用分解后的子系统，我们提出了一种基于经济模型预测控制的分布式协作方案，以便根据电网的非计划功率需求，精确调节发电功率，同时满足系统的局部冷却需求和经济需求。分布式经济模型预测控制涉及多个按顺序执行并进行迭代的智能体，各智能体具有全局目标函数，并通过交换最新评估的信息协同进行决策。因此，子系统中的所有单元均能够实时协作，以实现既定的控制目标。此外，本文还讨论了子系统分解对综合能源系统分布式模型预测控制设计的潜在影响，并为复杂能源系统的子系统分解提供了基本指导原则。通过不同工作条件下的仿真，验证了所提出的分解与协作策略的适用性和有效性。

本文的主要贡献如下：

1. 我们提出了一种基于增广雅可比矩阵的综合能源系统新型有向图表示方法，该方法明确揭示了综合能源系统结构中所有动态变量之间的内在互联性。

2. 我们提出了一种通用的子系统分解方法，该方法基于动态变量的动态时间尺度及其互连紧密度，同时处理综合能源系统结构与动态特性的复杂性，并高效确定最优子系统配置。

3. 我们阐释了分解后的子系统特征如何影响综合能源系统分布式模型预测控制的设计，从而为复杂能源系统的模块化管理提供面向控制的基本分解指南。

4. 我们开发了一种基于经济模型预测控制、适用于综合能源系统的可扩展分布式协作方案，涵盖所有分解后的子系统，以实现全系统协同并提升响应能力和动态性能。

总之，本文提出了新方法，用于理解综合能源系统的结构与动态特性、分解复杂能源系统，以及设计分布式控制方案，从而实现高效且有效的模块化管理。

本文组织结构如下：第2节介绍所考虑的综合能源系统及控制问题；第3节阐述分解方法并进行相关讨论；第4节构建分布式经济模型预测控制；第5节开展仿真；第6节总结全文。

2 系统描述与问题表述

2.1 系统描述

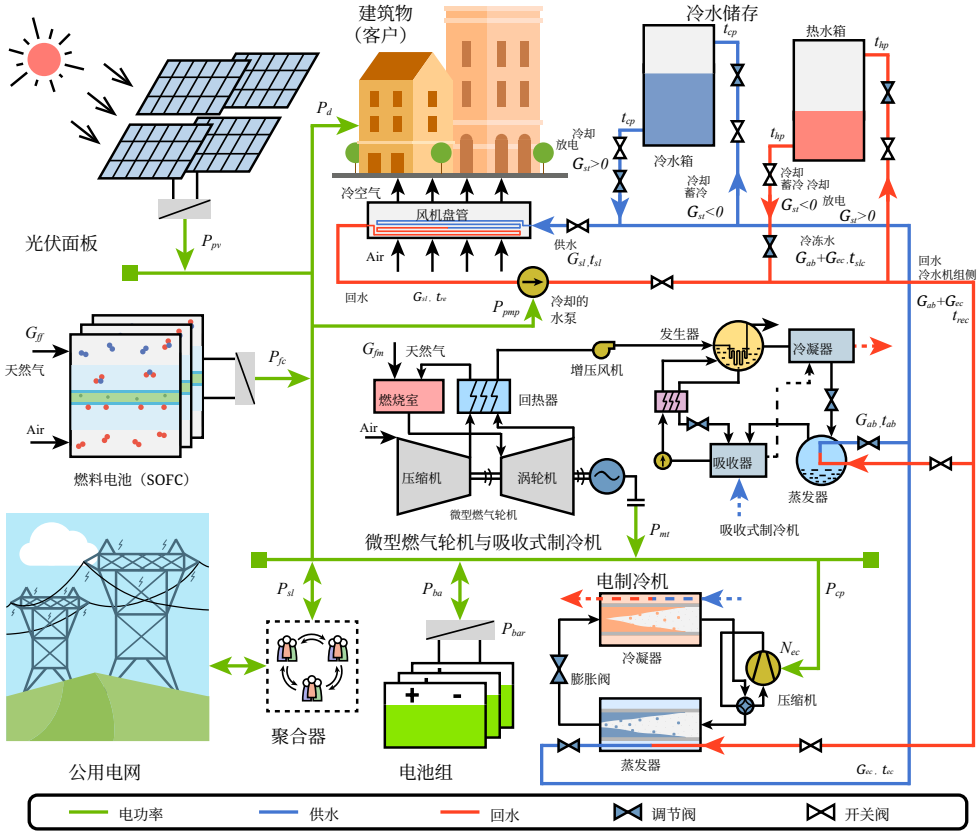

图1：所研究的并网综合能源系统。

图1展示了本文所考虑的并网综合能源系统。综合能源系统旨在：（a）满足本地微电网的电力需求（用户负荷）；（b）使建筑温度保持在客户指定范围内；（c）将多余电力输送至公用电网（下文简称电网），也可以通过聚合器输送；（d）提高综合能源系统的盈利能力。该综合能源系统可以参与电网响应。当提供电网响应时，系统需要根据电网或聚合器的实时指令，快速调节其发电功率；否则，系统将按照预先规划的功率基线 [13]向电网或聚合器供电。由于这些指令对于综合能源系统而言属于外部信号，后文不再区分其来源。此外，假设在该系统中，当发电功率不足以同时满足微电网和电网的需求时，为确保本地微电网的可靠性，将优先满足微电网的电力需求。随后，多余或不足的电力将通过联络线输送至电网或从电网输入 [55]。该假设是

这是基于以下考虑得出的：电网中还有其他可调度发电资源，可维持电力潮流平衡 [15]。

如图1所示，所研究的综合能源系统包含以下运行单元：光伏组件（PV）、燃料电池（FC）、电池组（BA）、微型燃气轮机（MT）、吸收式制冷机（ST）、电制冷机（EC）、冷水储存装置（CS）和建筑物（客户），这些设备通过微电网或辅助管网连接。在电力供应侧，微型燃气轮机和燃料电池利用天然气发电，而光伏组件利用太阳能发电。这些设备与电池组构成互补系统，以克服可再生能源的间歇性问题。这些设备和电池组（放电模式下）的电力首先通过微电网供给客户、水泵、电制冷机和电池组（充电模式下），随后送入电网。在供冷侧，微型燃气轮机燃烧室产生的废烟气被送入吸收式制冷机，以制取冷冻水。同时，电制冷机利用电力冷却回水。随后，冷水机组产生的冷冻水与冷水箱中的冷水（若冷水储存装置处于供冷放电模式）混合，或部分送入冷水箱（若冷水储存装置处于供冷充电模式）。混合后的水或剩余冷冻水通过水泵输送至下游风机盘管，以降低室内温度。供水在风机盘管中被加热，变为回水。若冷水储存装置处于供冷放电模式，回水将直接输送至冷水机组和热水箱，用于下一轮冷却循环；否则，回水需要与热水箱中的水混合后再送至冷水机组。储能单元——电池组和冷水储存装置——还需承担长期负荷转移任务。

我们之前的工作 [24] 详细介绍了各运行单元的非线性动态建模。关于各运行单元的详细说明和参数，请参阅该工作。系统中涉及的状态、操纵输入、扰动和输出变量的定义列于表1。下文将简要介绍系统结构。

具体而言，采用最大功率点跟踪实现的光伏组件可描述为稳态非线性模型。光伏板产生的电力 P_{pv} 可表示为：

$$P_{pv} = n_{pp} n_{sp} \frac{I_{pv,max} V_{pv,max}}{1000} \tag{1}$$

其中， n_{pp} 和 n_{sp} 分别为并联和串联光伏板的数量；$I_{pv,\,max}$ 和$V_{pv,\,max}$ 分别为给定扰动 t_a 和 S_{ra} 下流经每块光伏板的电流和电压，它们满足一组特定的非线性代数方程。

燃料电池的动态特性可由五个状态方程表示，用于描述 I_f、 G_{H_2}、 p_{O_2}、 p_{H_2O} 和 p_{H_2} 的时间导数。随后，燃料电池的电功率 P_{fc} 可被

表1：状态、输入、扰动和输出变量的定义

状态	
I_f	燃料电池中的内部电流
G_{H_2}	燃料电池中的氢气摩尔流量
p_{O_2}	燃料电池中的氧分压
p_{H_2O}	燃料电池中的蒸气分压
p_{H_2}	FC中的氢分压
P_{mtf}	MT中由燃料流量变化引起的电功率增量
t_{abf}	AB中由微型燃气轮机排气变化引起的冷冻水温度增量
t_{abw}	AB中由回流量变化引起的冷冻水温度增量
t_{abt}	AB中由回水温度变化引起的冷冻水温度增量
t_c	EC中的冷凝温度
t_{cs}	电制冷机中的冷凝器壳体温度
t_{cwm}	电制冷机中的冷却水平均温度
t_e	电制冷机中的蒸发温度
t_{es}	电制冷机中的蒸发器壳体温度
t_{ewm}	电制冷机中的冷冻水平均温度
v_{cap}	电池组中的电容器电压
C_{soc}	电池组中的容量状态（荷电状态）
I_{ba}	电池组中的通过电流
C_{sot}	CS中的容量状态（冷水状态）
C_{stc}	CS中冷水箱中水的热容量
C_{sth}	CS中热水箱中水的热容量
t_{re}	风机盘管的回水温度
t_{br}	建筑温度
连续输入	
G_{ff}	FC 中天然气进料流量
G_{fm}	微型燃气轮机（MT）的天然气进气流量
G_{ab}	吸收式制冷机中的冷冻水流量
N_{ec}	电制冷机中的压缩机转速
G_{ec}	电制冷机中的冷冻水流量
G_{stu}	CS中的水流量绝对值
P_{bar}	电池组输出电力参考信号
整数输入	
z_{fc}	燃料电池中开启/关闭
z_{ma}	微型燃气轮机和吸收式制冷机的开启/关闭状态
z_{ec}	电制冷机的开/关状态
z_{st}	冷水储存装置的蓄冷/放冷
扰动	
t_a	环境温度
S_{ra}	太阳辐射
P_d	微电网中的电负荷
Q_o	其他冷却负荷
输出	
P_{sl}	输送至公用电网的电力
t_{br}	建筑温度

计算如下:

$$P_{fc} = z_{fc}\frac{V_{fc}I_{fc}}{10^3} \tag{2}$$

其中， V_{fc} 和 I_{fc} 分别表示燃料电池的输出电压和外部电流，其中 V_{fc} =$V_0 - \eta_a - \eta_c - \eta_o$ 其中，V_0、 η_a、 η_c和 η_o 分别表示电势电压以及活化、浓差和电阻造成的电压损失。所有这些变量均取决于燃料电池中提到的五个状态，而状态 G_{H_2} 取决于输入 G_{ff}。

对于与吸收式制冷机组合的微型燃气轮机，采用四个常微分方程，通过状态 P_{mtf}、 t_{abf}、t_{abw}和 t_{abt}描述其动态行为。 P_{mtf}和t_{abw} 分别取决于输入 G_{fm} 和 G_{ab}。随后，可按如下方式计算微型燃气轮机与吸收式制冷机产生的电功率 P_{mt} 和供水冷冻水温度 t_{ab}：

$$P_{mt} = z_{ma}(P_{mt,0} + P_{mtf}) \tag{3}$$

$$t_{ab} = t_{ab,0} + t_{abf} + t_{abw} + t_{abt} \tag{4}$$

其中，$P_{mt,\ 0}$ 和 $t_{ab,\ 0}$ 分别为额定电功率和供水冷冻水温度。吸收式制冷机的制冷功率可通过 $Q_{ab} = G_{ab}C_w(t_{rec} - t_{ab})$ 计算，其中 C_w 表示水的比热容； t_{rec} 为冷水机组侧的回水温度。

接下来，系统采用锂离子电池组的动态戴维南等效模型。三个关于状态 v_{cap}、 C_{soc} 和 I_{ba} 的常微分方程描述了其瞬态性能。然后，电池组输出的电力 P_{ba} 可由下式求得:

$$P_{ba} = \frac{V_{ba}I_{ba}}{10^3} \tag{5}$$

其中， V_{ba} 是电池组的电压，通过 $V_{ba} = n_{sb}(E_m - v_{cap} - R_{0b}i_{ba})$ 计算得出。在该表达式中， n_{sb} 为串联电池单体的数量； E_m 表示电势； R_{0b} 为并联电阻； i_{ba} 表示每个并联电池单体中的电流，该电流与 I_{ba} 及输入 P_{bar} 有关。当 $P_{ba} > 0$ 时，电池组处于放电状态，否则处于充电状态。

电制冷机由蒸发器、压缩机、冷凝器和膨胀阀组成。其动态特性可通过由六个状态t_e、 t_{es}、t_{ewm}、 t_c、 t_{cs}和 t_{cwm}构成的六阶时间微分方程来描述。这些状态与两个输入 N_{ec} 和 G_{ec}相关。接下来，可计算压缩机的耗电量 P_{cp} 以及电制冷机供应的冷冻水温度 t_{ec}

如下:

$$P_{cp} = z_{ec}\frac{G_r w_i}{\eta_{cp}} \tag{6}$$

$$t_{ec} = 2t_{ewm} - t_{rec} \tag{7}$$

其中， G_r、 w_i和 η_{cp} 分别为制冷剂的质量流量、压缩机的比功率和压缩机效率； t_{rec} 为冷水机组侧与吸收式制冷机相同的回水温度。 G_r、 w_i和 η_{cp} 的变化取决于上述六个状态和两个输入。类似地，电制冷机的制冷功率可由 Q_{ec} =$G_{ec}C_w$($t_{rec} - t_{ec}$)求得。

接下来，冷水储存装置由冷水箱和热水箱组成。其动态特性可用 C_{stc}、 C_{sth}和 C_{sot}的三个状态导数方程表示。储能单元的制冷功率可表示为 $Q_{st} = G_{st}C_w(t_{hp} - t_{cp})$，其中， $G_{st} = z_{st}G_{stu}$ +($z_{st} - 1$)G_{stu}为水流量， $t_{hp} = z_{st}t_{re}$ +(1 − z_{st})t_{sth} 表示连接热水箱的管道中的水温， $t_{cp} = z_{st}t_{stc}$ + (1 − z_{st})t_{slc} 为通往冷水箱的管道中的水温。在这些公式中， z_{st} 和 G_{stu} 分别表示整数输入和连续输入； t_{re} 为来自建筑物的回水温度，该温度是风机盘管中的一个状态； t_{slc} 为冷水机组供应的冷冻水温度； t_{sth} 和 t_{stc} 分别表示热水箱和冷水箱中的水温，可通过上述三个状态求得。当 $z_{st} = 1$ 时，冷水储存装置放冷，且 G_{st}， $Q_{st} > 0$；否则则充冷。

在建筑物和辅助管网中，建筑物和风机盘管的热惯性通过两个随时间演化的状态 t_{br} 和 t_{re}来表征。作为系统输出之一的建筑温度 t_{br}遵循以下微分方程:

$$\frac{dt_{br}}{d\tau} = \frac{U_{br}(t_a - t_{br}) - Q_{sl} + Q_o}{C_{br}} \tag{8}$$

其中， U_{br} 为传热系数； t_a 为与光伏组件中相同的扰动；Q_{sl} 表示向客户提供的最终制冷功率； Q_o 为另一种扰动； C_{br}表示建筑物的热容量。此外， Q_{sl} 可通过 $Q_{sl} = G_{sl}C_w$（$t_{re} - t_{sl}$）计算，其中 G_{sl}为输送至建筑物的供水质量流量， $G_{sl} = G_{ab} + G_{ec} + G_{st}$、 t_{sl} 为建筑物的最终供水温度，其表达式如下:

$$t_{sl} = \frac{G_{ab}t_{ab} + G_{ec}t_{ec} + G_{st}t_{cp}}{G_{sl}} \tag{9}$$

此外，如图1所示，供水和回水的能量与质量平衡

在管道不同位置的表达式如下：

$$t_{rec} = \frac{G_{sl}t_{re} - G_{st}t_{hp}}{G_{ab} + G_{ec}} \tag{10}$$

$$t_{slc} = \frac{G_{ab}t_{ab} + G_{ec}t_{ec}}{G_{ab} + G_{ec}} \tag{11}$$

$$G_{all} = G_{ab} + G_{ec} + G_{stu} \tag{12}$$

其中， t_{rec} 和 t_{slc} 分别表示前文所述冷水机组侧的回水温度和冷水机组的供水温度； G_{all} 表示管网中循环水的总流量。随后可由下式计算水泵的电功率：

$$P_{pmp} = \frac{G_{all}g_e H_{pmp}}{10^3 \eta_{pmp}} \tag{13}$$

其中， g_e 为重力加速度； H_{pmp} 和 η_{pmp} 分别为水头和泵效率，后者与 G_{all}相关联。

因此，考虑到本地微电网P_d 中的电负荷将优先得到满足这一假设，输送至公用电网的电功率（即系统的另一项输出）可计算如下：

$$P_{sl} = P_{pv} + P_{fc} + P_{mt} + P_{ba} - P_{cp} - P_{pmp} - P_d \tag{14}$$

总而言之，IES 的动态特性由 23 个非线性常微分方程描述。图2展示了 IES 内各运行单元之间的互联关系，以及系统中的能量与物质流。表2给出了 IES 在标称条件下的典型变量数值。

2.2 控制问题的表述

并网综合能源系统具有七个连续操纵输入、四个外部扰动（不可控输入）和两个关键受控输出。系统的动态行为由分布在构成综合能源系统的运行单元中的二十三个状态表征。此外，综合能源系统中还涉及四个整数输入，用于表示各单元的启停以及蓄冷的充放电模式。然后，我们可以将连续输入向量定义为 $u = [G_{ff}, G_{fm}, G_{ab}, N_{ec}, G_{ec}, G_{stu}, P_{bar}]^T$，将整数输入向量定义为 $z = [z_{fc}, z_{ma}, z_{ec}, z_{st}]^T$，将扰动-

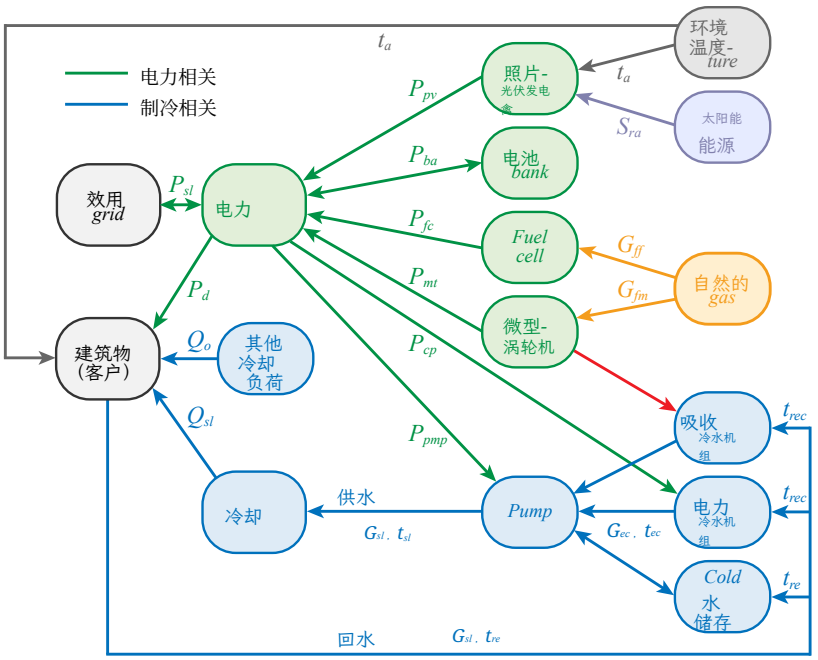

图2：综合能源系统内各运行单元之间的能量与物料流及互联关系。（请注意，该图展示的是综合能源系统在单元级的连接关系，不包括单元内部交互。）

表2：标称条件下的典型变量值

变量	数值	Unit	变量	数值	Unit
P_{pv}	44	kW	Q_{ab}	75	kW
P_{fc}	40	kW	Q_{ec}	50	kW
P_{mt}	80	kW	Q_{st}	0 $(-21 \sim 21)$	kW
P_{ba}	0 $(-40 \sim 40)$	kW	Q_{sl}	125	kW
P_{cp}	12.6	kW	t_{ab}	7	°C
P_{pmp}	13.9	kW	t_{ec}	7	°C
t_{sl}	7	°C	t_{cp}	7	°C
t_{re}	12	°C	t_{hp}	12	°C

扰动向量为 $\omega = [t_a, S_{ra}, P_d, Q_o]^T$，状态向量为 $x = [I_f, G_{H_2}, p_{O_2}, p_{H_2O}, p_{H_2}, P_{mtf}, t_{abf}, t_{abw}, t_{abt}, t_c, t_{cs}, t_{cwm}, t_e, t_{es}, t_{ewm}, v_{cap}, C_{soc}, I_{ba}, C_{sot}, C_{stc}, C_{sth}, t_{re}, t_{br}]^T$，受控输出向量为 $y = [P_{sl}, t_{br}]^T$。因此，并网综合能源系统可由以下简洁的非线性状态空间模型表示：

$$\frac{dx}{d\tau} = f(x(\tau), u(\tau), z(\tau), \omega(\tau)) \tag{15a}$$

$$y(\tau) = h(x(\tau), u(\tau), z(\tau), \omega(\tau)) \tag{15b}$$

其中， $x \in \mathbb{R}^{n_x}$、 $u \in \mathbb{R}^{n_u}$、 $z \in \{0,1\}^{n_z}$、 $\omega \in \mathbb{R}^{n_d}$、 $y \in \mathbb{R}^{n_y}$以及 $n_x = 23$、 $n_u = 7$、 $n_z = 4$、 $n_d = 4$、$n_y = 2$ 分别表示状态、连续输入、整数输入、扰动和输出的数量。

并网综合能源系统可视为一个高度复杂的过程网络，其中各种运行单元通过能源流、物质流和信息流紧密互联，如图2所示。一方面，对于采用标准预测控制的综合能源系统而言，管理众多决策变量之间复杂的互联关系可能十分困难 [32]。集中式架构会造成过重的计算负担 [32]。此外，如果使用此类基于优化的策略时未考虑多时间尺度，所形成的控制问题可能变得病态 [27]。另一方面，在处理综合能源系统结构中的连接关系时，如果未对各子系统进行适当配置，非集中式框架可能导致鲁棒性不足和控制性能下降 [42, 45]。此外，由于可再生能源和本地客户需求具有波动性，综合能源系统容易受到不稳定环境条件以及本地微电网中电力和冷却需求的影响。总之，综合能源系统实时协调控制面临的主要挑战，是在有效应对外部扰动的同时，妥善处理综合能源系统中表现出的多时间尺度以及强烈的单元间及单元内相互作用。其目标是使各单元紧密协作，根据电网请求调节其产生或消耗的电力，同时维持建筑温度和系统盈利能力。系统性能的三个评价指标如下所示：

$$J_1 = \|y_1 - (1+\xi)y_e^b\|^2 \tag{16a}$$

$$J_2 = \|y_2 - y_{sp,t}\|^2 \tag{16b}$$

$$J_3 = -\left(p_{mg}\omega_3 + p_{se}y_1 + p_{cm}\xi_{as}y_e^b - p_f(u_1+u_2) - p_{pn}\|y_1 - (1+\xi)y_e^b\|^2\right) \tag{16c}$$

其中， ξ 表示调节能力因子，即电网实时请求的非计划功率与先前向电网承诺的计划基准功率 y_e^b 之比；$y_{sp,t}$表示允许范围内的期望建筑温度； p_{mg} 和 p_{se} 分别表示微电网中的电价和电网中的批发电价； p_{cm} 表示提供电网响应的补偿； $\xi_{as} = |\xi|$ 表示调节能力因子的绝对值； p_f 表示天然气价格； p_{pn} 表示未能提供承诺的电网响应 [56]所产生的罚款。 J_1 和 J_2 分别反映供电量偏离电网指令以及建筑温度偏离客户指定值的程度。 J_3 评估系统的盈利能力，其等于利润值的负值。

3 提出的垂直-水平子系统分解

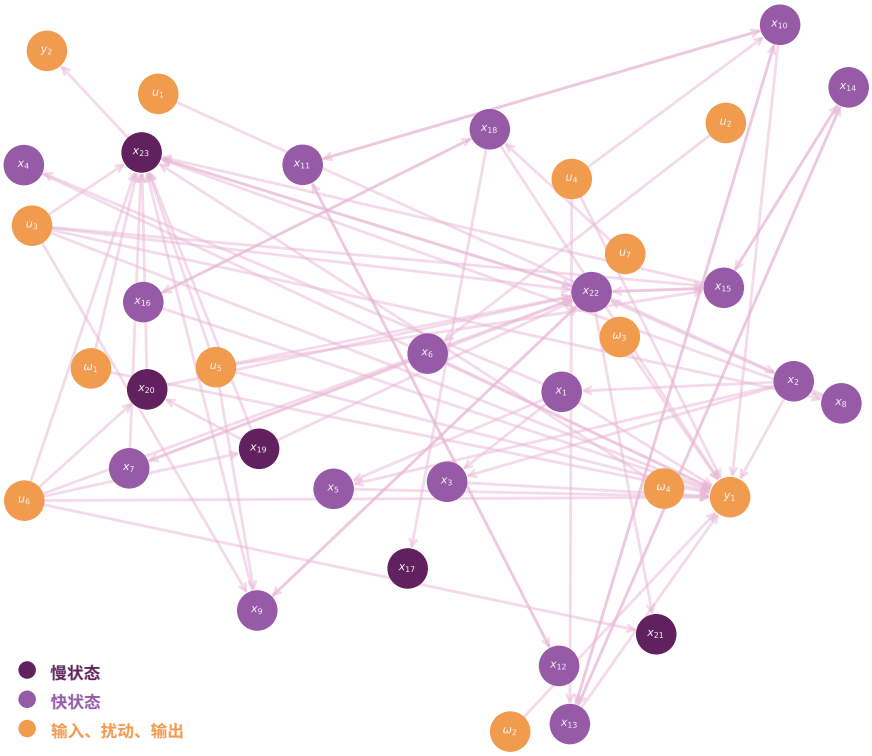

图 3：并网综合能源系统的有向图：将变量视为节点，并通过有向边将其连接起来：(1) 深紫色和浅紫色节点分别表示慢状态和快状态；(2) 橙色节点表示操纵输入、扰动（不可控输入）和受控输出；(3) 有向边表示边起始节点对应变量的数值或动态直接影响边终止节点所示变量。

并网综合能源系统可表示为一个有向图，如图3所示。该图考虑了单位间和单位内部连接的细节，包括输入、扰动、状态和输出变量之间的交互作用。与图2相比，图3揭示了综合能源系统的底层网络拓扑，以及所开发控制方案将处理的各种变量之间的互联关系。分布式和去中心化控制方法在协调具有复杂结构且决策变量众多、相互紧密连接的大型能源系统方面非常有效 [33]。为了在综合能源系统中实施这些非集中式策略，确定最优子系统配置是至关重要的第一步。此外，在处理动态变量之间的互联关系时，必须考虑动态时间尺度多重性。为此，本节提出了一种基于增强型时间尺度分离和社区检测技术的垂直-水平子系统分解框架，以同时解决上述困难。

3.1 有向图邻接矩阵的构建

虽然有向图（图3）展示了输入、扰动、状态和输出变量之间的详细关系，但直接用它分析变量之间的互联性并实现子系统分解目标可能颇具挑战。因此，本文基于综合能源系统的雅可比矩阵构建邻接矩阵，以数学方式表示有向图。

构建邻接矩阵之前，需要注意图3中的以下几点。首先，由于关注的是综合能源系统中不同变量（节点）之间的互联关系和交互作用，因此有向图不包含起点和终点相同的有向自环。其次，考虑到综合能源系统易受不确定外部条件影响，需将扰动对其他变量的影响纳入考量。最后，根据有向边的定义，当起始变量的函数对终点变量的偏导数不为零时，两个节点（即两个变量）之间存在一条有向边，反之亦然 [57]。例如，图3中存在一条从 u_3 到 x_{23} 的有向边，其等于 $\partial f_{23}(x,\ u,\ z,\ \omega)/\partial u_3 \neq 0$ 其中 $f_{23}(x,\ u,\ z,\ \omega)$ 是式（15）中向量场 f 的第23个元素。

基于这些考虑，首先构建式（15）中整个综合能源系统的增广雅可比矩阵 $\mathbf{A}_e$，如下所示：

$$\tilde{\mathbf{A}}_e = \begin{bmatrix} \tilde{A}_{n_x\times n_x} & \tilde{B}_{n_x\times n_g} & \mathbf{0}_{n_x\times n_y} \\ \mathbf{0}_{n_g\times n_x} & \mathbf{0}_{n_g\times n_g} & \mathbf{0}_{n_g\times n_y} \\ \tilde{C}_{n_y\times n_x} & \tilde{D}_{n_y\times n_g} & \mathbf{0}_{n_y\times n_y} \end{bmatrix}_{n_v\times n_v} \tag{17}$$

其中，$n_v = n_u + n_d + n_x + n_y$ 为输入、扰动、状态和输出变量的总数；$n_g = n_u + n_d$ 为增广输入向量 u_g 中的变量数，该向量由原始输入向量和扰动向量组成，即 $u_g = [u^T, \omega^T]^T$；$\tilde{A}$、$\tilde{B}$、$\tilde{C}$ 和 $\tilde{D}$ 为式（15）中向量场 f 和 h 的以下雅可比矩阵：

$$\begin{aligned} \tilde{A} &= \left.\frac{\partial f(x,u,z,\omega)}{\partial x}\right|_{(x_e,u_e,z_e,\omega_e)}, \quad \tilde{B} = \left.\frac{\partial f(x,u,z,\omega)}{\partial u_g}\right|_{(x_e,u_e,z_e,\omega_e)} \\ \tilde{C} &= \left.\frac{\partial h(x,u,z,\omega)}{\partial x}\right|_{(x_e,u_e,z_e,\omega_e)}, \quad \tilde{D} = \left.\frac{\partial h(x,u,z,\omega)}{\partial u_g}\right|_{(x_e,u_e,z_e,\omega_e)} \end{aligned} \tag{18}$$

$\tilde{A}$、$\tilde{B}$、$\tilde{C}$ 和 $\tilde{D}$ 其中（x_e，u_e，z_e，ω_e）表示系统的一个平衡点。A、B、C 和 D 分别表示是否存在以下有向边：状态到状态、输入/扰动到状态、状态到输出，以及输入/扰动到输出。假设这些雅可比矩阵中某个元素所表示的偏导数非零，则应在有向图中对应的两个节点（变量）之间添加一条有向边，反之亦然。

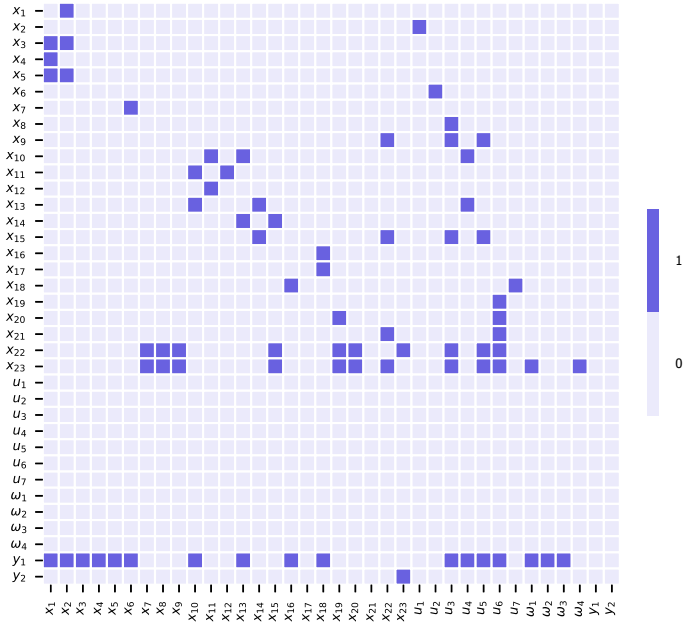

图 4：整个网络的可视化邻接矩阵：综合能源系统有向图的数学表示。

因此，整个综合能源系统网络的邻接矩阵$\mathbf{A}_e$ 可通过以下方式得到：˜(a) 将$\mathbf{A}_e$ 中的所有非零元素替换为1；˜(b) 将$\mathbf{A}_e$ 中的对角元素设为零，因为图中不包含自环

h.

因此，在邻接矩阵 $\mathbf{A}_e$ 中，当存在从节点 i 到节点 j 的有向边时，位于第 i 行、第 j 列的元素为 1，记作 $a_{ij}^e = 1$；否则为 $a_{ij}^e = 0$。由此可计算出标称条件下 IES 的邻接矩阵，并将其可视化为图 4，后续将用于 IES 的垂直-水平分解。

注释 1. 综合能源系统中外部扰动的持续存在是实现协调控制目标的主要挑战之一。因此，将扰动的影响纳入有向图和邻接矩阵中。尽管由于扰动变量不可控，可能没有必要对其进行划分，但考虑扰动与系统之间的联系有助于实现信息充分且最优的子系统分解。

3.2 基于时间尺度分离的垂直分解

本节采用我们先前工作 [24] 中提出的时间尺度分离方法，处理综合能源系统中的动态时间尺度多重性。通过引入邻接矩阵改进该方法，从而有效实现子系统分解。沿时间尺度缩减方向，这种分解将整个综合能源系统纵向划分为慢子系统和快子系统

因此，这些子系统能够与系统在多个时间尺度上的动态响应相匹配。

3.2.1 综合能源系统的奇异摄动建模

表3：各状态的近似主导时间常数

状态	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}
时间常数（s）	0.8	5	2.9	78	26	20	130	80	70	1.2	1.5	23.3
状态	x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}	x_{17}	x_{18}	x_{19}	x_{20}	x_{21}	x_{22}	x_{23}	
时间常数（s）	1.2	1.5	19.6	6.2	14865	0.8	18000	18000	18000	20	12652	

为实现时间尺度分解，需要确定式（15）中综合能源系统各状态的主导时间常数，以确认多时间尺度的存在。因此，计算了可作为动态响应时间尺度指标的各状态近似时间常数，并列于表 3 [24]中。由表3可知，状态 x_{17}、 x_{19}、 x_{20}、 x_{21} 和 x_{23} 的时间常数明显大于其余状态，这意味着前述状态的动态响应显著慢于后者。因此，式（15）中综合能源系统的所有状态可分为两类：慢动态 x_s 和快速动态x_f。慢动态由五个状态 $x_s = [x_{17}, x_{19}, x_{20}, x_{21}, x_{23}]^T$组成，即电池组和蓄冷 x_{17} 与 x_{19}的容量状态、冷水箱和热水箱内容物的热容量 x_{20} 与 x_{21}，以及建筑温度 x_{23}。如果将建筑物视为被动储能单元，则慢动态完全由多个主动和被动储能单元构成。另一方面，综合能源系统的其余状态构成快速动态，即
$x_f = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{15}, x_{16}, x_{18}, x_{22}]^T$，主要包括燃料电池、微型燃气轮机、吸收式制冷机、电制冷机和电池等多种发电机与冷水机组。这些运行单元通常比建筑物的热惯性以及储能单元的容量状态具有更快的动态响应。随后，选取 x_5 和 x_{23} 的时间常数作为分别对应快速动态和慢动态的代表性时间常数，记为 τ_{tc}^f 和 τ_{tc}^s。

随后，通过将式(15a)中与快速动态相关的方程除以 τ_{tc}^s，式(15)中的并网综合能源系统可表示为奇异摄动形式 [58]，如下所示：

$$\frac{dx_s}{d\tau} = f_s(x_s, x_f, u_s, z, \omega) \tag{19a}$$

$$\epsilon\frac{dx_f}{d\tau} = f_f(x_s, x_f, u_s, u_f, z) \tag{19b}$$

$$y_s(\tau) = h_s(x_s) \tag{19c}$$

$$y_f(\tau) = h_f(x_f, u_s, u_f, z, \omega) \tag{19d}$$

其中， ϵ （$0 < \epsilon \ll 1$）表示一个用于区分综合能源系统中不同时间尺度的小无量纲参数，其计算如下：

$$\epsilon = \frac{\tau_{tc}^f}{\tau_{tc}^s} = \frac{26}{12652} = 0.00206 \ll 1 \tag{20}$$

利用邻接矩阵 $\mathbf{A}_e$ （可将其视为系统的连接图），我们可以考察慢/快动态与连续输入之间的连接关系。例如，在邻接矩阵 $\mathbf{A}_e$中，位于行 x_{23} 、列 u_3 的元素为 1，这表明 u_3 会直接影响 x_{23}。根据分析，式（15）中的连续输入可根据式（19）中的慢动态和快速动态分为两类：慢连续输入 $u_s = [u_3, u_5, u_6]^T$ 会立即影响慢动态，而快速连续输入 $u_f = [u_1, u_2, u_4, u_7]^T$ 则会显式影响快速动态。对式（15）中的受控输出进行分类也采用类似方法。因此， $y_s = y_2$（即建筑温度）是系统中的慢输出，取决于慢动态；$y_f = y_1$（即输送至电网的电功率）是与快速动态相关的快输出。此外还应指出，在推导式（19）时，也使用了所提出的邻接矩阵来分析慢状态和快状态之间的相互连接关系，以及输入如何影响输出。

3.2.2 基于时间尺度分离建立慢子系统和快子系统

基于综合能源系统的奇异摄动表达式，我们可以进一步对系统进行时间尺度分离。根据奇异摄动理论 [27], ，在式（19）中令 $\epsilon = 0$ ，可得到慢速子系统的以下降阶模型：

$$\frac{dx_s}{d\tau} = f_s(x_s, x_f, u_s, z, \omega) \tag{21a}$$

$$0 = f_f(x_s, x_f, u_s, u_f, z) \tag{21b}$$

$$y_s(\tau) = h_s(x_s) \tag{21c}$$

$$y_f(\tau) = h_f(x_f, u_s, u_f, z, \omega) \tag{21d}$$

其中，快速动态的微分方程 Eq.(19b) 变为代数方程 Eq.(21b)。该代数方程表明，慢速子系统无需考虑快速动态。

为建立降阶快速子系统，我们需要定义一个拉伸时间尺度 $\tau_f = \tau/\epsilon$，以匹配快速动态，并将 τ_f 代入 Eq.(19)，然后令 $\epsilon \to 0$。因此，快速子系统的降阶模型可表示如下：

$$\frac{dx_s}{d\tau_f} = 0 \tag{22a}$$

$$\frac{dx_f}{d\tau_f} = f_f(x_s, x_f, u_s, u_f, z) \tag{22b}$$

$$y_f(\tau_f) = h_f(x_f, u_s, u_f, z, \omega) \tag{22c}$$

在式（22a）中，快速子系统中的慢动态被视为常量。这意味着在快速时间尺度内，慢动态的任何细微变化都可以忽略不计，因此可以从快速子系统中排除与之相关的信息。

综合能源系统的垂直分解已完成。根据动态响应的时间尺度，所有变量均被划分到慢子系统和快子系统中。每个子系统中的动态均具有统一的时间尺度，从而解决了综合能源系统中的动态时间尺度多重性问题。

备注 2. 针对综合能源系统构建标准的奇异摄动表达式，是时间尺度分离方法中的必要步骤。本研究引入邻接矩阵来简化这一过程。借助邻接矩阵，我们可以快速识别与快速动态和慢动态相关的变量，从而高效确定式（19）奇异摄动表达式右侧的参数。对于包含众多变量的大型能源系统，分析系统连通性可能颇为困难。不过，邻接矩阵使垂直分解易于实现，简化了这一过程。

3.3 基于社区检测的横向分解

完成对综合能源系统（IES）的垂直分解后，可以发现，式（22）的快速子系统仍然是一个包含十八个状态的高阶系统。相比之下，式（21）的慢速子系统仅由五个状态组成，因此适合进行控制器设计。这一结果是合理的，因为综合能源系统包含多种发电机、冷水机组、电池和辅助单元，与建筑物和储能单元中的少数慢状态相比，这些单元表现出相对较快的动态响应。此外，由于动态响应迅速，快速子系统在响应电网请求时可以发挥关键作用。然而，变量紧密互连的快速子系统仍然是一个复杂的过程网络。因此，本节提出一种基于社区检测的综合能源系统子系统分解方法，该方法被视为横向分解。

旨在解决 IES 动态互联性的方法。通过对所考虑的网络（快速子系统）进行横向分解，相关变量进一步划分为若干更小的子系统。

3.3.1 基于模块度的社区检测

社区检测是图论中的一种强大技术，可将整个网络划分为所需的社区或子系统，这些社区或子系统具有较强的子系统内交互作用和较弱的子系统间交互作用 [59]。在本研究中，我们将社区检测引入综合能源系统，从而能够探索并分解系统内部的互联关系。通过采用社区检测，我们可以确保子系统内部连接密集，而不同子系统之间的互联关系稀疏，这符合非集中式控制架构的预期 [43]。在现有的社区检测工具中，基于 Newman 模块度的方法已成为主流方法。该方法的核心是一个称为模块度的指标，用于衡量已配置候选子系统的质量 [60]。已配置子系统 Θ 的典型 Newman 模块度可计算如下：

$$M(\Theta) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^{n_v} \sum_{j=1}^{n_v} \left(a_{ij} - \frac{k_i^{in} k_j^{out}}{m} \right) \delta(c_i, c_j) \tag{23}$$

其中，i，$j = 1$，……，n_v为有向图中的节点，n_v为上述有向图中节点（变量）的总数；m 表示边的数量；a_{ij} 为所研究图的邻接矩阵中的第（i，j）个元素；提醒一下，如果存在一条从第 j个元素指向第 i个元素的有向边，则 $a_{ij} = 1$ ，否则 $a_{ij} = 0$；k_i^{in}和 k_j^{out}分别表示指向节点 i和从节点 j 发出的边的数量；c_i和c_j（c_i，$c_j \in \{c_1, \ldots, c_{n_v}\}$）是社区标签，表示节点 i 和 j 在子系统配置 Θ 中所属的子系统；δ（c_i，c_j）是克罗内克δ函数，用于判断节点 i 和 j是否属于同一子系统，其计算方法如下：

$$\delta(c_i, c_j) = \begin{cases} 0, & \text{if} \quad c_i \neq c_j \\ 1, & \text{if} \quad c_i = c_j \end{cases} \tag{24}$$

在式（23）的模块度表达式中，项（$a_{ij} - k_i^{in} k_j^{out}/m$）表示在网络中所有边随机重连、且固定 k_i^{in}和 k_j^{out}时，节点 i 与 j 之间边的实际概率与预期概率之差。模块度是这一差值的总和，因此反映了子系统划分 Θ 的统计显著性。模块度越大，表示子系统划分越优，即

子系统内部连接密集，而不同子系统之间连接稀疏。因此，社区检测旨在从所有候选子系统划分中，找到使模块度最大的子系统配置 Θ 及所有节点 $\{c_1, \ldots, c_{n_v}\}$ 对应的社区标签集，即:

$$M = \max_{c_1,\ldots,c_n} M(\Theta) \tag{25}$$

以下各节将针对这一优化问题提出有效的解决方案。

3.3.2 子系统分解的社区检测实现 n

为执行社区检测，我们需要目标网络的邻接矩阵，即快速子系统的邻接矩阵$\mathbf{A}f$。回顾式（22）中所述的快速子系统降阶模型，快速子系统中的慢动态被视为常数向量，但仍会影响快速动态。这意味着慢动态相对于快速动态的偏导数为零，而快速动态对慢动态的影响保持不变。考虑原始邻接矩阵$\mathbf{A}e$中各元素的含义，我们可以通过将$\mathbf{A}e$ 中与慢速子系统相关的所有行元素替换为零，推导出$\mathbf{A}f$ ；也就是说，将 x_{17}、 x_{19}、 x_{20}、 x_{21}、 x_{23}、u_3、 u_5、 u_6和 y_2 所在行的元素置为零。

接下来，我们将执行社区检测，进一步分解快速子系统。从数学上来说，式（25）是一个计算难度较高的优化问题 [61], ，因此我们需要一种近似算法来求解。本文采用并改进了一种称为快速展开算法 [62], 的启发式方法，该方法被认为是处理式（25）的一种有效且高效的方法。所提出的社区检测能够最大化模块度M，并获得接近全局最优解的配置社区标签集 $\{c_1, \ldots, c_n\}$，由此可构建若干规模较小的快速子系统。所提出算法的执行过程如算法1所示。

为实现综合能源系统的横向分解，所开发的社区检测方法遵循快速展开算法的基本思想，即有限移动和聚合（步骤 2.2） [62]。原始的快速展开算法是一种启发式算法，可能只能找到局部最优解。此外，得到的子系统将用于设计分布式控制器。子系统过多会增加局部控制器之间的通信成本。为改进快速展开算法，我们进行了以下修改:

(a) 为减少初始节点顺序对分解结果的影响，算法现在采用一组随机节点顺序（步骤 2.1）。

(b) 为避免 子系统数量过多，可能会增加系统中的维护成本 e

算法1： 基于快速展开的社区检测，用于横向分解

步骤1：参数设置：
预先确定所需社区（子系统）数量的上限： N_c^u。
指定主程序循环的终止条件： N_l^l，主程序循环的下限次数 N_l； N_m^l，最大模块度 M_{max} 递归 N_m 的下限。
创建与快速邻接矩阵 $\mathbf{A}f$ 对应的节点向量：$\mathbf{v} = [x_1, \ldots, x_{n_x}\ u_1, \ldots, u_{n_u}\ \omega_1, \ldots, \omega_{n_d}\ y_1, \ldots, y_{n_y}]$.
创建$\mathbf{v}$的社区标签向量：$\mathbf{c} = [c_{x_1}, \ldots, c_{x_{n_x}}\ c_{u_1}, \ldots, c_{u_{n_u}}\ c_{\omega_1}, \ldots, c_{\omega_{n_d}}\ c_{y_1} \ldots, c_{y_{n_y}}]$.
创建初始最优节点和社区标签向量：$\mathbf{c}^{opt} = \mathbf{c}$ 和$\mathbf{v}^{opt} = \mathbf{v}$。
设置 $N_l = 0$, $N_m = 0$, $M_{max} = 0$.
步骤 2：主程序：
当 $N_l < N_l^l$ 或 $N_m < N_m^l$ **时 do**
  步骤 2.1：初始化：
  随机重新排列$\mathbf{v}$中节点的顺序，记为$\hat{}\mathbf{v}$；计算相应的邻接矩阵 $\hat{\mathbf{A}}f$ 通过$\mathbf{A}f$。
  设置 $k = 0$；令$\mathbf{c}(k) = [1, 2, \ldots, n_v]$，即将$\hat{}\mathbf{v}$ 中的第 i个节点分配到第 i个社区；计算 $M(k)$以及社区 $N_c(k)$的数量。
  步骤 2.2：模块度最大化：
  重复
    设置 $k = k + 1$。
    对每个节点 i **执行**
      将 i 移入相邻节点 j（包括 i 本身）。
      找到最大值 M（k）；让 i 留在对应的社区中。
    将同一社区中的节点聚合为一个新节点。
    更新 $\mathbf{c}(k)$、 $N_c(k)$ 和 $M(k)$。
  直到 $M(k) = M(k-1)$;
  步骤 2.3：社区缩减：
  当 $N_c(k) > N_c^u$**时**
    设置 $k = k + 1$。
    对于每个节点 i **执行**
      将 i 移入相邻节点 j（不包括其自身 i）。
      求最大模块度 M_{ij}（k）。
    求最大 M_{ij}（k）；令 M（k） $= M_{ij}$（k）；将 i 放入对应的社区。
    将同一社区中的节点聚合为一个新节点。
    更新 $\mathbf{c}$（k）、 N_c（k）和 M（k）。
  步骤 2.4：社区配置更新：
  如果 $M(k) > M_{max}$ **则**
    更新 $M_{max} = M(k)$、$\mathbf{c}^{opt} = \mathbf{c}(k)$ 和 $\mathbf{v}^{opt} = \hat{}\mathbf{v}$；重置 $N_m = 0$。
  else
    如果 $N_l \geq N_l^l$且 $M(k) = M_{max}$**则**
      更新 $N_m = N_m + 1$。
  更新 $N_l = N_l + 1$。
步骤 3：最终结果：
从$\mathbf{c}^{opt}$ 和$\mathbf{v}^{opt}$中提取每个社区（子系统）中的相关变量。

控制 s 为系统中的子系统数量设定了上限（步骤 2.3 ）.

（c）为防止算法陷入局部最优解，我们对主程序循环次数和最大模块度递归次数设置了阈值（步骤 2.4）。

基于这些改进，所提出的社区检测方法能够获得近似全局最优解，并根据变量之间的互连紧密度，高效且有效地分解目标系统。

3.3.3 基于社区检测建立更小的快速子系统 n

表4：快速子系统1、2、3中的变量和运行单元。

Fast 子系统 i	状态	输入	输出	涉及的运行单元
1	x_1： I_f, x_2： G_{H_2},x_3： p_{O_2}, x_4：p_{H_2O}, x_5： p_{H_2}, x_{16}： v_{cap}, x_{18}：I_{ba}	u_1： G_{ff}, u_7： P_{bar}	y_1：P_{sl}	燃料电池，电池，光伏
2	x_6： P_{mtf}, x_7： t_{abf},x_8： t_{abw}, x_9： t_{abt}, x_{15}：t_{ewm}, x_{22}：t_{re}	u_2：G_{fm}	y_1：P_{sl}	微型燃气轮机，吸收式制冷机和电制冷机、风机盘管单位、光伏
3	x_{10}：t_c, x_{11}：t_{cs}, x_{12}： t_{cwm}, x_{13}：t_e, x_{14}：t_{es}	u_4：N_{ec}	y_1：P_{sl}	电制冷机 ，光伏

根据所提出的社区检测，式（22）的快速子系统可划分为三个规模较小的子系统：快速子系统1、快速子系统2和快速子系统3。表4列出了快速子系统划分结果。从表4可以看出，快速子系统1包含仅与电力生产相关的运行单元，即燃料电池、电池组和光伏。快速子系统2包含与电力、冷却、风机盘管机组和管道相关的单元，这是因为上游微型燃气轮机与下游吸收式制冷机之间，以及后者与冷却分配网络之间存在紧密的互联关系。同时，电制冷机蒸发器中的冷冻水平均温度 x_{15} 被划分至快速子系统 2，因为它与管网中的供水 / 回水存在强烈的交互作用。此外，只有快速子系统2直接与慢速子系统的动态特性 x_s 交互。另一方面，电制冷机的内部运行状态被划分至快速子系统3。这些结果表明，所提出的横向分解能够充分捕捉各变量之间潜在的交互作用，并在不受运行单元形式限制的情况下对其进行划分。

基于分解结果以及具有全局目标函数的预期分布式控制器，我们可以建立快速子系统 1、2 和 3 的统一模型如下：

$$\begin{aligned}\frac{dx_{f_j}}{d\tau_f} &= f_{f_j}(x_{f_j}, \bar{x}_{f_j}, u_{f_j}, \bar{u}_{f_j}, z)\\ y_{f_j}(\tau_f) &= h_{f_j}(x_{f_j}, \bar{x}_{f_j}, u_{f_j}, \bar{u}_{f_j}, z, \omega)\end{aligned} \tag{26}$$

其中，下标 f_j, $j = 1,2,3$ 表示快速子系统 j；x_{f_j} 是快速子系统 j 中的状态向量；$\bar{x}_{f_j}$ 表示一个状态向量，其中包含其他子系统的状态，这些状态会直接影响快速子系统 j，或供快速子系统 j 的本地决策代理使用；u_{f_j} 表示由快速子系统 j 的本地代理优化的操纵输入；$\bar{u}_{f_j}$ 是由其他子系统的本地控制器确定的输入向量；$\bar{u}_{f_j}$ 要么直接影响快速子系统 j，要么包含快速子系统 j 的本地控制器进行决策所需的信息。具体而言，

（a）对于快速子系统 1，$x_{f_1} = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_{16}, x_{18}]^T$, $\bar{x}_{f_1} = [x_{f_2}^T, x_{f_3}^T]^T$, $u_{f_1} = [u_1, u_7]^T$, $\bar{u}_{f_1} = [u_s^T, u_{f_3}^T]^T$, $y_{f_1} = y_1$;

（b）对于快速子系统 2，$x_{f_2} = [x_6, x_7, x_8, x_9, x_{15}, x_{22}]^T$, $\bar{x}_{f_2} = [x_s^T, x_{f_1}^T, x_{f_3}^T]^T$, $u_{f_2} = u_2$, $\bar{u}_{f_2} = [u_s^T, u_{f_3}^T]^T$, $y_{f_2} = y_1$;

(c) 对于快速子系统 3, $x_{f_3} = [x_{10}, x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14}]^T$, $\bar{x}_{f_3} = [x_{f_1}^T, x_{f_2}^T]^T$, $u_{f_3} = u_4$, $\bar{u}_{f_3} = u_s$, $y_{f_3} = y_1$.

需要指出的是，首先，快速子系统 j 中的 $\bar{x}_{f_j}$ 和 $\bar{u}_{f_j}$ 可通过所设计控制策略中的信息交换获得。其次，根据式（22a）的垂直分解结果，在快速时间尺度下，式（26）中的 x_s 和 u_s 仍视为常数。最后，在横向分解过程中，我们通过与快速子系统 2 和 3 共享 y_1和光伏，对结果进行了小幅调整。详情请参见注释 3。最终，通过垂直-水平分解方法，整个综合能源系统被分解为一个慢速子系统式（21）和三个快速子系统式（26）。

注3. 所提出的分解方法将能源网络中的节点划分为互不重叠的子系统，使管理者能够更清晰地了解候选子系统。如何利用分解结果取决于具体问题。在本研究中，综合能源系统协调控制的主要目标是实现全系统协同并提高响应能力，而响应能力与输送至电网的功率 y_1密切相关。我们注意到，y_1通过微型燃气轮机的发电量P_{mt}与快速子系统*2*明确相关，也通过电制冷机的耗电量 P_{cp}与快速子系统*3*相关。此外，y_1 直接受到光伏功率 P_{pv} 的影响，而光伏功率取决于外部扰动。然而，若我们直接遵循快速子系统的横向分解结果，y_1 和光伏将被单独划分至快速子系统*1*。这种配置可能会导致一些局部

控制智能体采用局部目标函数，其性能通常略逊于全局目标函数 *[32]*。因此，为便于制定具有全局目标的分布式协作方案，我们将 y_1 和光伏共享给快速子系统*2*和*3*，如表*4*所示。尽管我们没有完全遵循初始分解结果，但它为子系统分解提供了重要且充分的指导。

3.4 综合能源系统子系统分解的讨论

本节将介绍子系统分解如何影响综合能源系统分布式控制架构的设计，并介绍一种分解复杂能源系统的基本通用流程。

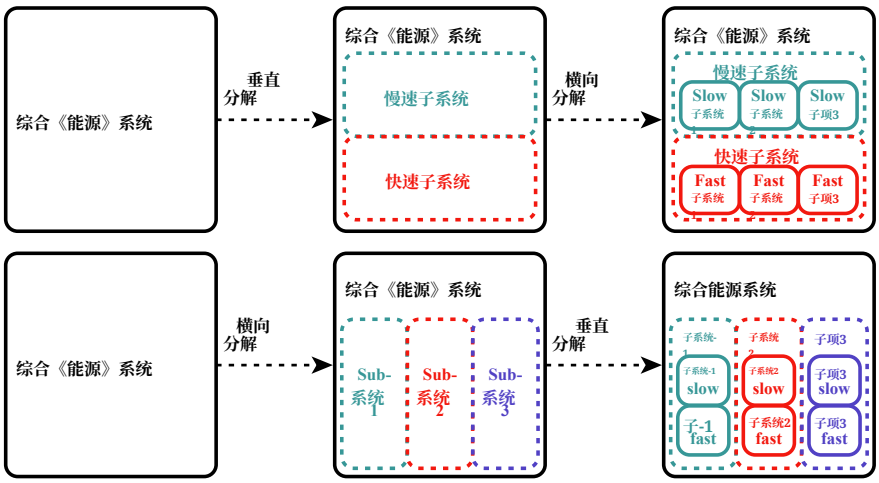

图 5：两种可能的分解流程：上：先进行垂直分解，再进行横向分解；下：先进行横向分解，再进行垂直分解。

为了处理多时间尺度和结构复杂性，提出了子系统分解方法，以对综合能源系统进行垂直和横向划分。进行垂直划分时，信息通常沿自上而下的方向依次流动，从而形成顺序式分布式控制结构 [32]。横向划分涉及多个相互交换信息的子系统，从而形成迭代式分布策略 [32]。在所提出的分解框架中，假设先进行垂直分解，然后在快速子系统中实施横向分解。请注意，如有需要，也可以对慢子系统应用横向分解。另一种方式是先对综合能源系统进行横向分解，然后在每个子系统中进行垂直分解。这两种分解过程如图5所示。对于综合能源系统，推荐采用前一种过程。原因有两点：（a）综合能源系统的预期目标以及相关分布式控制器设计的难度；（b）规模和数量的

分解后的子系统及相应的通信成本。

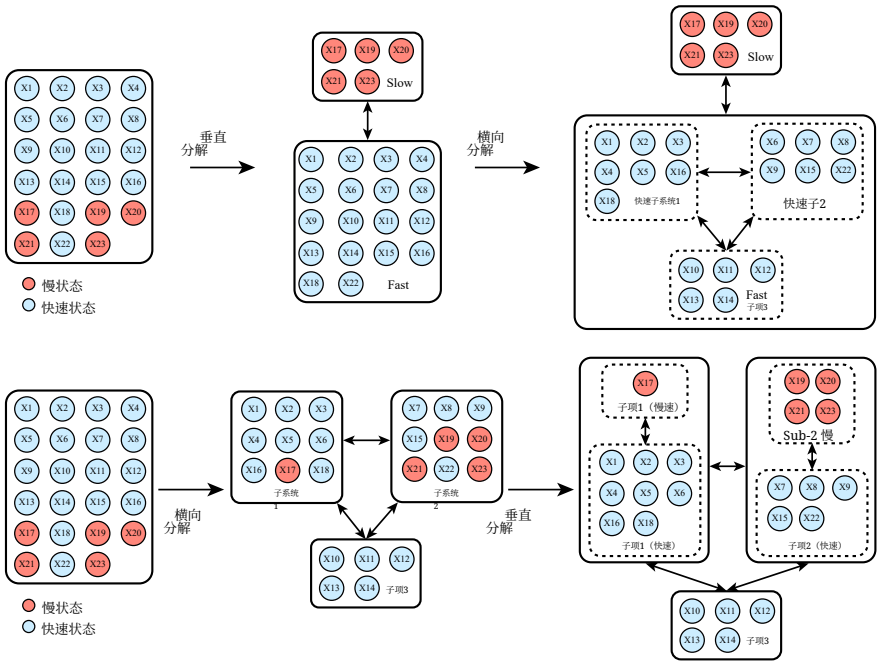

图6：两种分解过程的分解结果：上图：先进行纵向分解，再进行横向分解；下图：先进行横向分解，再进行纵向分解。

图6展示了将两种过程应用于综合能源系统所得的分解结果。从图6可以看出，先进行垂直分解、再进行横向分解，会形成四个更为均衡的子系统，其中所有慢状态都位于同一个子系统中。在这种情况下，慢子系统和快速子系统的分布式控制器只需遵循顺序范式。可以自然地为快速子系统设计迭代分布式控制器，使运行单元能够在统一时间尺度内协同实现快速响应。若先进行横向分解、再进行垂直分解，则会形成五个子系统，其中一个仅包含单个慢状态，另一个不包含任何慢状态。从维护和控制设计的角度来看，这种分解结果可能并不理想。如果直接遵循这一结果，子系统之间及子系统内部的非均匀时间尺度将导致更加复杂的迭代分布式控制器，并需要异步采样时间 [63]。此外，在这种情况下，子系统的数量多于前一种分解过程。因此，通信成本将更高。另一种方法是人为合并两个慢子系统，以减少子系统数量。然而，对于包含大量变量的较大能源系统而言，这可能是一项具有挑战性的任务。此外，我们注意到，先进行垂直分解有助于创建具有不同时间尺度的综合能源系统模型，这有利于综合能源系统参与在多个时间尺度上运行的能源市场，参见 [13]。

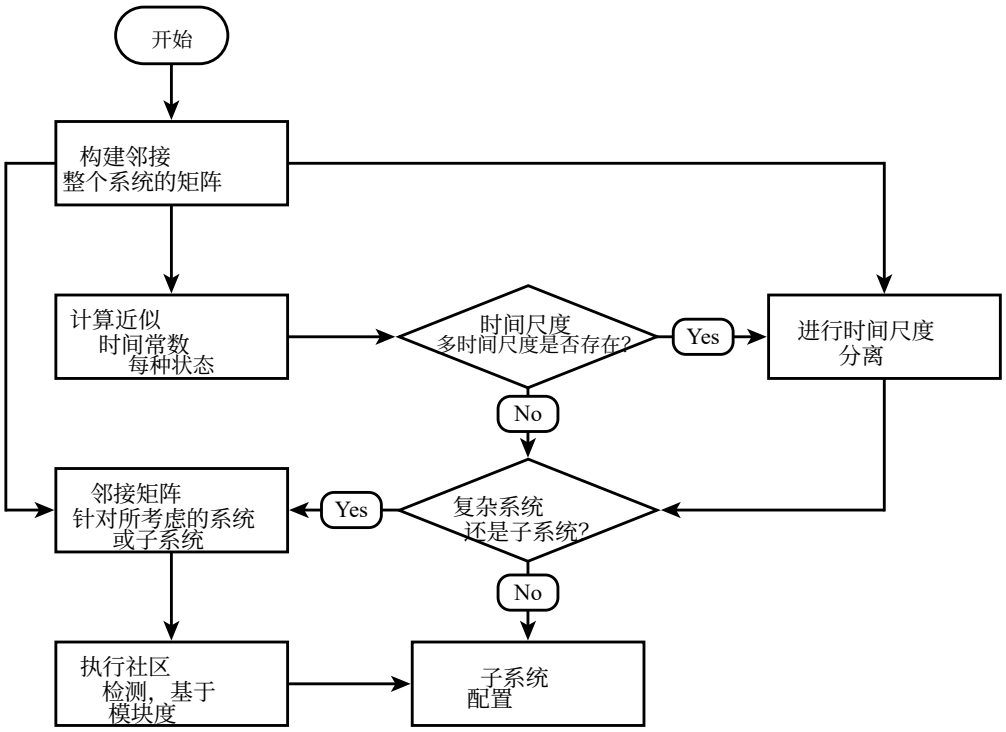

图7：复杂能源系统通用子系统分解的基本流程。

基于这些考虑，对于具有多时间尺度和复杂结构的综合能源系统或能源系统，应先进行垂直分解，再进行横向分解，以在子系统内建立一致的时间尺度。随后实施横向分解，以捕捉子系统之间及内部的交互作用，从而进一步划分。图 7 展示了我们提出的通用垂直-水平分解方法的基本步骤，该方法也可应用于其他复杂能源系统，例如虚拟电厂和聚合器 [12, 64]。图 7 中需要注意的是，并非所有能源系统都需要同时进行垂直分解和横向分解。例如，大型风光电场 [35] 或建筑群 [10] 可能不需要进行时间尺度分离，因为它们分别具有统一的快速或慢速时间尺度。如何恰当利用子系统分解，也应考虑待解决的优化问题。对于跨部门的综合能源系统，分解时可能还需要进一步考虑管辖权归属 [65]方面的潜在问题。下一节将说明如何利用分解后的子系统特征，基于经济模型预测控制设计分布式协作方案。

4 协同分布式经济MPC

如前所述，相较于标准的集中式控制器，分布式协作方案在协调综合能源系统中的运行单元方面更具优势。要有效、可靠地管理综合能源系统，必须能够快速响应电网电力需求的变化，同时满足本地电力和冷却需求、最大化利润并减轻外部扰动。本节提出一种合作式分布式经济模型预测控制方法，以应对这些挑战。我们的方法基于子系统分解和经济模型预测控制，可扩展应用于其他综合能源系统。图8展示了所提出的综合能源系统分布式经济模型预测控制框架。

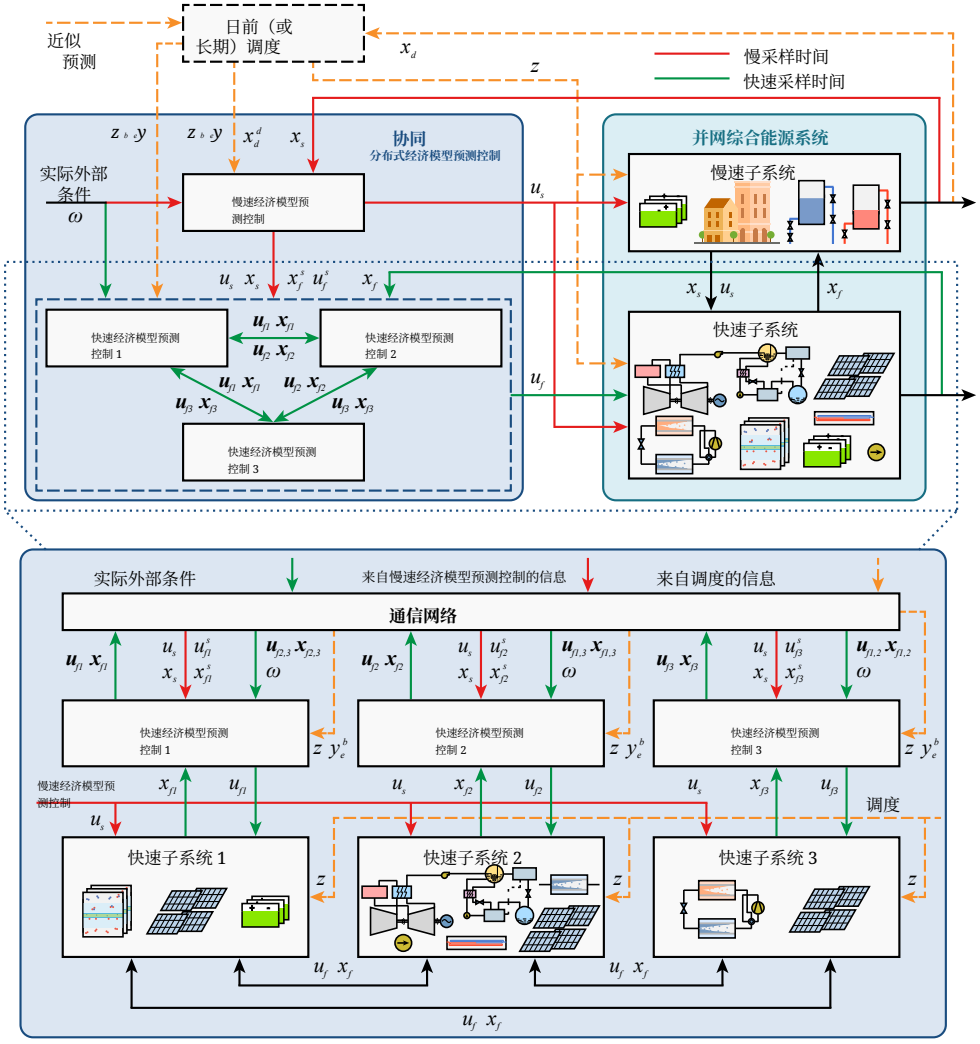

图8：所提出的面向综合能源系统的合作式分布式经济模型预测控制。

分布式经济模型预测控制还会考虑与日前/长期调度（或必要时的日内阶段）之间的信息交换。日前阶段将规划输送至电网的小时电力，并依据外部条件预测安排综合能源系统的大致运行轨迹——

量。本研究采用了基于我们先前工作 [24]中的长期调度方法改编的日前优化。有关所用调度方法的更多信息，请参阅该文献。日前调度旨在最小化式(16)所述的控制目标，以确定：(a) 小时供电功率，即式(16)中的计划基准功率 y_e^b；(b) 单元的开关状态以及蓄冷的充电/放电状态，即式(15)中的整数变量 z；(c) 用于长期负荷转移的储能容量状态的最优轨迹参考值，即 x_{17} (C_{soc}) 和 x_{19} (C_{sot}) 的参考值，以向量x_d^d表示。

关于所提出的分布式经济模型预测控制，它基于纵向-横向分解结果，由四个相互协作的经济模型预测控制器组成：一个用于慢速子系统的慢速经济模型预测控制器，以及三个用于快速子系统的快速经济模型预测控制器。这些局部决策代理彼此交换信息，以协调各自的行动，实现所有子系统间的动态协同。在分布式经济模型预测控制中，通信的特点是：低频下，信息从慢速经济模型预测控制器单向流向快速经济模型预测控制器；高频下，快速智能体之间则以相互交互的方式交换信息。前者形成顺序分布式经济模型预测控制，后者形成迭代分布式经济模型预测控制，二者协同利用各运行单元。

具体而言，根据式（21）中的慢速子系统，构建了慢速经济模型预测控制器，其采样时间约为 1 分钟，预测窗口为 10 至 15 分钟，用于在当前外部条件 ω 和慢状态 x_s下优化其动态行为。慢速经济模型预测控制器通过最小化与 J_1、 J_2和 J_3相关的全局目标函数，获得慢输入u_s 的最优控制动作，以及快速输入和状态的最优参考值，即 u_f^s 和 x_f^s。随后，慢输入 u_s 立即作用于慢速子系统以对其进行控制。所需信息（如 u_s、 x_s、 u_f^s和 x_f^s）会发送至快速经济模型预测控制器，以供进一步决策。在优化过程中，慢速经济模型预测控制器还会考虑日前调度提供的有关 y_e^b、 z和 x_d^d 的信息。

对于快速经济模型预测控制器，基于式(26)分解得到的快速子系统，设计了三个局部控制智能体，其采样时间为几秒，预测窗口约为1分钟。这些局部智能体相互协作，在特定外部条件 ω 和快状态 x_f下管理快速子系统中的运行单元。快速经济模型预测控制器通过共享最新信息并最小化包含 J_1 和 J_3的联合全局目标函数，协调各自的控制动作。在通信过程中，快速经济模型预测控制器从日前阶段获取有关 y_e^b 和z的信息，并从慢速经济模型预测控制器获取有关 u_s、 x_s、 u_f^s和 x_f^s的信息。此外，局部快速智能体 $j(j=1,2,3)$不仅接收其他局部快速经济模型预测控制器的信息，还会广播其最新优化得到的状态和输入序列 $\mathbf{x}^{f_j}$ 和 $\mathbf{u}^{f_j}$，供其他局部快速智能体进行决策。

在每个采样时间，这三个快速经济模型预测控制器会交换信息并反复评估其动作 u_{f_j}，直至接近迭代上限或这些经济模型预测控制器的动作收敛。因此，通过这种迭代方式可以获得快速经济模型预测控制器 j 的最终最优快速输入 u_{f_j}，随后 u_{f_j} 进入相应的快速子系统 j，以管理其中所属的单元。

4.1 串行分布式慢速经济模型预测控制

本节将针对慢速子系统的最优运行，构建串行分布式慢速经济模型预测控制。在控制器设计之初，需要确立该控制方案的控制目标。对于时间点 k的慢速经济模型预测控制，根据式(21)中的慢速子系统模型和式(16)中的全局运行目标，考虑以下控制目标：

$$J_1^s(k) = \alpha_1^s \|y_f(k) - (1+\xi(k))y_e^b(k)\|^2 \tag{27a}$$

$$J_2^s(k) = \alpha_2^s \|y_s(k) - y_{sp,t}(k)\|^2 \tag{27b}$$

$$\begin{aligned} J_3^s(k) = &- \alpha_3^s(p_{mg}(k)\omega_3(k) + p_{se}(k)y_f(k) + p_{cm}(k)\xi_{as}(k)y_e^b(k) \\ &- p_f(k)(u_{f,1}(k) + u_{f,2}(k)) - p_{pn}(k)\|y_f(k) - (1+\xi(k))y_e^b(k)\|^2) \end{aligned} \tag{27c}$$

$$J_4^s(k) = \|x_s^d(k+1) - x_d^d(k+1)\|_{R^s}^2 \tag{27d}$$

其中，$\alpha_w^s (w = 1, \ldots, 3)$和 R^s 分别表示加权因子和矩阵。式(27a)至(27c)中的目标分别用于评估系统跟踪电网实时供电指令、满足客户冷却需求以及提高运行收益的表现。它们由式(16)中全局目标的离散化推导得出。式(27d)是长期负荷转移的一般跟踪项，其中 $x_s^d = [x_{s,1}, x_{s,2}]^T$ 是表示电池和蓄冷容量状态的向量，x_d^d 是它们通过日前调度得出的最优参考值。

利用这些目标和慢速子系统模型，串行分布式慢速经济模型预测控制器描述如下：

$$\min_{u_s, u_f, x_f, y_{sp,t}} \sum_{i=0}^{N_p^s - 1} J_1^s(k+i) + J_2^s(k+i) + J_3^s(k+i) + J_4^s(k+i) \tag{28a}$$

$$s.t.\ x_s(k+i+1) = f_s(x_s(k+i), x_f(k+i), u_s(k+i), z(k+i), \omega(k+i)) \tag{28b}$$

$$0 = f_f(x_s(k+i+1), x_f(k+i+1), u_s(k+i), u_f(k+i), z(k+i)) \tag{28c}$$

$$y_s(k+i) = h_s(x_s(k+i)) \tag{28d}$$

$$y_f(k+i) = h_f(x_f(k+i), u_s(k+i), u_f(k+i), z(k+i), \omega(k+i)) \tag{28e}$$

$$z_r(k+i)u_r^{min} \le u_r(k+i) \le z_r(k+i)u_r^{max} \tag{28f}$$

$$\Delta u_r^{min} - V_r \le \Delta u_r(k+i) \le \Delta u_r^{max} + V_r \tag{28g}$$

$$x_r^{min} \le x_r(k+i+1) \le x_r^{max} \tag{28h}$$

$$y_{sp,t}^{min}(k+i) \le y_{sp,t}(k+i) \le y_{sp,t}^{max}(k+i) \tag{28i}$$

其中，N_p^s表示慢速经济模型预测控制的预测时域；下标 $r = s, f$分别表示与慢速子系统和快速子系统相关的变量，且 $z_s = \text{diag}([z_2, z_3, 1])$,$z_f = \text{diag}([z_1, z_2, z_3, 1])$；上标 min和 max表示相关变量的下界和上界；$\Delta u_r(k+i) = u_r(k+i) - u_r(k+i-1)$表示两个时刻之间输入的增量，且 $V_r = |z_r(k+i) - z_r(k+i-1)|C_n$，其中 C_n是一个足够大的常数；当 z_r 在时刻 k发生变化时，使用 V_r绕过式（28g）的约束；$y_{sp,t}$ 是前述的期望室内温度。注意，y_e^b、x_d^d和 z 由日前调度获得。

在式(28)的顺序慢速经济模型预测控制中，式(28a)的目标函数是上述全局目标 J_1^s、J_2^s、J_3^s 和 J_4^s的加权和。式(28b)–(28e)表示由式(21)的离散化慢速子系统模型以及慢采样时间Δ_s所约束的优化问题。式(28f)–(28e)是对输入和状态的物理约束。式(28i)表示客户指定范围内设定的期望室内温度。

在采样时间 k，将通过求解式(28)的优化问题来执行慢速经济模型预测控制，从而获得整个预测时域的最优慢速输入序列 $\mathbf{u}_s^*(k) = [u_s^*(k) \ldots, u_s^*(k+N_p^s-1)]$。与此同时，慢速经济模型预测控制还会为快速子系统优化最优参考序列，即 $\mathbf{u}_f^*(k)$ 和 $\mathbf{x}_f^*(k)$。随后，将 $\mathbf{u}_s^*(k)$ 中的第一个慢速输入$u_s^*(k)$ 直接施加于慢速子系统，以调节其动态特性，同时将 $\mathbf{u}_f^*(k)$ 和 $\mathbf{x}_f^*(k)$ 中的第一个元素 $u_f^*(k)$ 和 $x_f^*(k+1)$ 作为参考值传递给快速经济模型预测控制器。$\mathbf{u}_s^*(k)$、$\mathbf{u}_f^*(k)$ 和 $\mathbf{x}_f^*(k)$ 的其余元素将被丢弃，并将在下一个时刻 $k+1$ 根据最新的外部条件和运行状态重新优化。这一过程称为滚动时域实施 [46]。为进行后续快速经济模型预测控制设计，令 $u_s(k) := u_s^*(k)$、$u_f^s(k) := u_f^*(k)$ 和 $x_f^s(k+1) := x_f^*(k+1)$。

4.2 迭代分布式快速经济模型预测控制器

本节提出的方法是三个分布式快速经济模型预测控制器，旨在以同步迭代的方式协调快速子系统中的所有单元，充分发挥其快速响应潜力。基于式（26）的快速子系统分解结果和式（16）的全局控制目标，时刻 k 快速经济模型预测控制器的统一全局目标函数为

表述如下：

$$J_1^{f_j}(k) = \alpha_1^{f_j} \| y_{f_j}(k) - (1+\xi(k)) y_e^b(k) \|^2 \tag{29a}$$

$$\begin{aligned} J_2^{f_j}(k) = & -\alpha_2^{f_j} (p_{mg}(k)\omega_3(k) + p_{se}(k) y_{f_j}(k) + p_{cm}(k)\xi_{as}(k) y_e^b(k) \\ & - p_f(k)(u_{f_1,1}(k) + u_{f_2,1}(k)) - p_{pn}(k) \| y_{f_j}(k) - (1+\xi(k)) y_e^b(k) \|^2) \end{aligned} \tag{29b}$$

$$J_3^{f_j}(k) = \| v_{f_j}(k) - v_{f_j}^s(k) \|^2_{R_1^{f_j}} \tag{29c}$$

$$J_4^{f_j}(k) = \| \epsilon_{f_j}^u(k) \|^2_{R_2^{f_j}} \tag{29d}$$

其中，上标和下标 f_j表示快速经济模型预测控制 j或快速子系统 j，且 $j=1$， 2、3；$\alpha_w^{f_j}$ 和 $R_w^{f_j}$ 分别为加权因子和矩阵。考虑到建筑温度直接受到慢速子系统的影响，快速经济模型预测控制器的主要目标是根据电网请求调节供电功率并最大化利润。公式（29a）和（29b）表示这些目标，同时也是公式（16a）和（16c）中全局目标的离散化形式。公式（29c）是一个通用跟踪目标，用于确保控制系统的稳定性。在公式（29c）中，$v_{f_j}(k) = [x_{f_j}(k+1)^T, \ u_{f_j}(k)^T]^T$是一个包含快状态和输入的增广向量，而$v_{f_j}^s(k) = [x_{f_j}^s(k+1)^T, \ u_{f_j}^s(k)^T]^T$是一个由慢速经济模型预测控制提供的最优参考值$u_f^s(k)$和 $x_f^s(k+1)$中的元素组成的向量。对于公式（29d）， $\epsilon_u^{f_j}(k)$是一个松弛变量向量，用于确保快速智能体的稳定性和迭代收敛。

综合考虑这些目标，快速子系统 j 的迭代分布式快速经济模型预测控制 $j(j=1, \ 2, \ 3)$ 表述如下：

$$\min_{u_{f_j}, x_{f_j}} \sum_{i=0}^{N_p^{f_j}-1} J_1^{f_j}(k+i) + J_2^{f_j}(k+i) + J_3^{f_j}(k+i) + J_4^{f_j}(k+i) \tag{30a}$$

$$s.t. \ x_{f_j}(k+i+1) = f_{f_j}(x_{f_j}(k+i), \bar{x}_{f_j}(k+i), u_{f_j}(k+i), \bar{u}_{f_j}(k+i), z(k+i)) \tag{30b}$$

$$y_{f_j}(k+i) = h_{f_j}(x_{f_j}(k+i), \bar{x}_{f_j}(k+i), u_{f_j}(k+i), \bar{u}_{f_j}(k+i), z(k+i), \omega(k+i)) \tag{30c}$$

$$z_{f_j}(k+i) u_{f_j}^{min} \le u_{f_j}(k+i) \le z_{f_j}(k+i) u_{f_j}^{max} \tag{30d}$$

$$\Delta u_{f_j}^{min} - V_{f_j} \le \Delta u_{f_j}(k+i) \le \Delta u_{f_j}^{max} + V_{f_j} \tag{30e}$$

$$x_{f_j}^{min} \le x_{f_j}(k+i+1) \le x_{f_j}^{max} \tag{30f}$$

$$\Delta u_{f_j,s}^{min} \le u_{f_j}(k+i) - u_{f_j}^s(k+i) + \epsilon_{f_j}^u(k+i) \le \Delta u_{f_j,s}^{max} \tag{30g}$$

$$\Delta u_{f_j,c}^{min} \le u_{f_j}^{(c)}(k+i) - u_{f_j}^{(c-1)}(k+i) \le \Delta u_{f_j,c}^{max} \tag{30h}$$

$$\Delta u_{f_j,p}^{min} - V_{f_j,p} \le u_{f_j}(k+i|k) - u_{f_j}(k+i|k-1) \le \Delta u_{f_j,p}^{max} + V_{f_j,p} \tag{30i}$$

其中，下标和上标 f_j 表示用于控制快速子系统 j的快速经济模型预测控制 j，

以及 $j=1$、2、3； $N_p^{f_j}$是快速智能体 j的预测时域； $z_{f_1}=\text{diag}([z_1,1])$、$z_{f_2}=z_2$和$z_{f_3}=z_3$ 为整数变量的取值；上标 min 和 max 以及项 Δu_{f_j} 和 V_{f_j}与慢速经济模型预测控制中的对应项类似，此处不再赘述； $u_{f_j}^s(k)$是快速经济模型预测控制 j的输入参考值，可从慢速经济模型预测控制优化得到的 $u_f^s(k)$中提取； $\epsilon_{f_j}^u(k)$是前述松弛变量； $u_{f_j}^{(c)}(k)$表示时刻 k第 c 次迭代时评估得到的快速输入 u_{f_j} ，其中 c表示快速经济模型预测控制器的第 c次迭代， $c=1$、.....、 c_{max}， c_{max}为迭代次数上限； $u_{f_j}(k+i|k)$表示时刻 k预测的快速输入 $u_{f_j}(k+i)$；当当前整数变量 $z_{f_j}(k)$与上一时刻 $z_{f_j}(k|k-1)$预测的整数变量不同时，使用 V_{f_j}、p 以省略式（30i）的约束； V_{f_j}、p的形式与前述V_{f_j} 和 V_r类似。请注意， y_e^b 和 z 来自日前阶段；根据式（22a）， x_s 和 u_s 由慢速经济模型预测控制给定，并保持为常数，直至下一个慢采样时间到来时更新。

在式(30)的优化中，迭代快速经济模型预测控制器旨在最小化式(30a)的联合全局目标函数，该函数由前述 $J_1^{f_j}$、 $J_2^{f_j}$、 $J_3^{f_j}$ 和 $J_4^{f_j}$ 组成。式(30b)和式(30c)是快速子系统模型的约束，该模型由式(26)中分解后的快速子系统以快速采样时间 Δ_f 离散化得到。式(30d)–(30f)是快速系统对状态和输入的限制。式(30g)–(30f)是为确保快速经济模型预测控制器的稳定性和良好的迭代收敛而设计的约束。具体而言，式(30g)旨在使快速输入保持在慢速经济模型预测控制所优化参考值的邻域内，从而有助于获得全局最优结果，并保持慢速和快速经济模型预测控制器的稳定性。式(30g)中的松弛变量 $\epsilon_{f_j}^u$ 是目标函数中的惩罚项。式(30h)用于限制当前采样时刻两次连续迭代之间快速输入的变化，这有助于快速经济模型预测控制器迅速收敛到联合最优解。式(30i)允许当前评估的快速输入 $u_{f_j}(k+i|k)$ 位于上一时刻 $u_{f_j}(k+i|k-1)$ 当前快速输入最新预测值的邻域内。$u_{f_j}(k+i|k-1)$ 的最后一个元素，即 $u_{f_j}(k+N_p^{f_j}-1|k-1)$，是由其倒数第二个元素进行的一步零阶外推。式(30i)还用于促进分布式智能体在迭代过程中快速收敛至联合最优解。$\Delta u_{f_j\,s}^{min}$、、 $\Delta u_{f_j\,s}^{max}$、、 $\Delta u_{f_j\,c}^{min}$、、 $\Delta u_{f_j\,c}^{max}$、、 $\Delta u_{f_j\,p}^{min}$、和 $\Delta u_{f_j\,p}^{max}$、是式(30g)–(30i)中的调节参数。若将这些参数设得相对较小，有助于式(30)快速收敛，但可能导致优化结果略显保守；反之，若将其设得相对较大，可能会扩大式(30)的可行域，但需要更长的收敛时间。

在采样时间 k，将迭代执行式 (30) 中的三个快速经济模型预测控制器，以评估其控制动作及相应状态，同时彼此共享最新的优化结果，以进行协同决策。在第 c 次迭代（$1<c<c_{max}$）：

(a) 快速经济模型预测控制器 1、2 和 3 交换上一次迭代 $c-1$ 中新优化得到的输入和状态序列，即 $\mathbf{u}_{f_j}^{(c-1)}(k) = [u_{f_j}^{(c-1)}(k)\ldots, u_{f_j}^{(c-1)}(k+N_p^{f_j}-1)]^T$以及 $\mathbf{x}_{f_j}^{(c-1)}(k) = [x_{f_j}^{(c-1)}(k+1)\ldots, x_{f_j}^{(c-1)}(k+N_p^{f_j})]^T$;

(b) 基于最新的$\mathbf{u}_{f_j}^{(c-1)}(k)$和$\mathbf{x}_{f_j}^{(c-1)}(k)$，以并行方式求解式(30)中快速经济模型预测控制器的优化问题，以评估当前迭代 c 下的输入和状态序列 $\mathbf{u}_{f_j}^{(c)}(k)$ 和$\mathbf{x}_{f_j}^{(c)}(k)$;

(c) 然后进入下一次迭代 $c+1$；同样，快速经济模型预测控制器 1、2 和 3 将彼此共享有关输入和状态序列 $\mathbf{u}_{f_j}^{(c)}(k)$ 和 $\mathbf{x}_{f_j}^{(c)}(k)$ 的信息，以便为本次迭代做好准备;

(d) 该迭代过程将持续进行，直到达到迭代上限 c_{max}或所有快速经济模型预测控制器均收敛，即 $(J_{f_i}^{(c)}(k) - J^{(c-1)}f_i(k))/J^{(c-1)}f_i(k) \leq \psi$其中 ψ为可调收敛阈值，且 $J_{f_i}^{(c)}(k) = \sum_{i=0}^{N_p^{f_j}-1} J_1^{f_j,(c)}(k+i)+J^{f_j,(c)}2(k+i)+J^{f_j,(c)}3(k+i)+J^{f_j,(c)}4(k+i)$，即式(30a)中的代价函数在第 c 次迭代时的计算值。

完成最后一次迭代后，快速经济模型预测控制器将在时刻 k 获得最终最优快速输入序列，记为 $\mathbf{u}_{f_j}^*(k) = [u_{f_j}(k)\ldots, {}^{u}f_j(k+N_p^{f_j}-1)]^T$。随后，将 $\mathbf{u}_{f_j}^*(k)$ 中的第一个元素 ${}^{u}f_j(k)$ 应用于快速子系统 j，以对其进行控制。优化序列 $\mathbf{u}_{f_j}^*(k)$ 中其余元素将被保留，并向前外推一步，作为下一时刻优化中式（30i）里的预测输入 ${}^{u}f_j(k+i+1|k)$。当到达下一时刻 $k+1$ 时，将根据最新的外部条件和快速子系统状态，重复上述迭代滚动时域实施过程。

注释4。 需要指出的是，快速子系统*2*中的微型燃气轮机与吸收式制冷机组合，其动态响应通常略慢于其他快速子系统中的运行单元。因此，式(30) 中的快速经济模型预测控制器*1*、*2*和*3*可能采用不同的预测时域$N_p^{f_j}(j = 1, 2, 3)$，以涵盖各自的主要动态特性。在这种情况下，对于快速经济模型预测控制器 $l(l = 1,2,3)$，采用截断和零阶外推，使接收到的 $\mathbf{u}_{f_j}^{(c)}(k)$ 和 $\mathbf{x}_{f_j}^{(c)}(k)(j \neq l)$ 与 $N_p^{f_l}$ 长度相同。

5 仿真与比较

本节将把所提出的分布式经济模型预测控制应用于并网综合能源系统。我们在一台配备 2.60 GHz 英特尔酷睿 i7-10750H 处理器和 16 GB 内存的计算机上进行仿真，并将其性能与多种控制方案进行比较。所有优化问题均由 IPOPT (3.12.3) 和 BONMIN (1.8.4) 求解器求解，这些求解器通过 CasADi 平台 (3.5.5) 在 [66]Python (3.7.6) 中实现。

5.1 用于对比的监督式模型预测控制架构

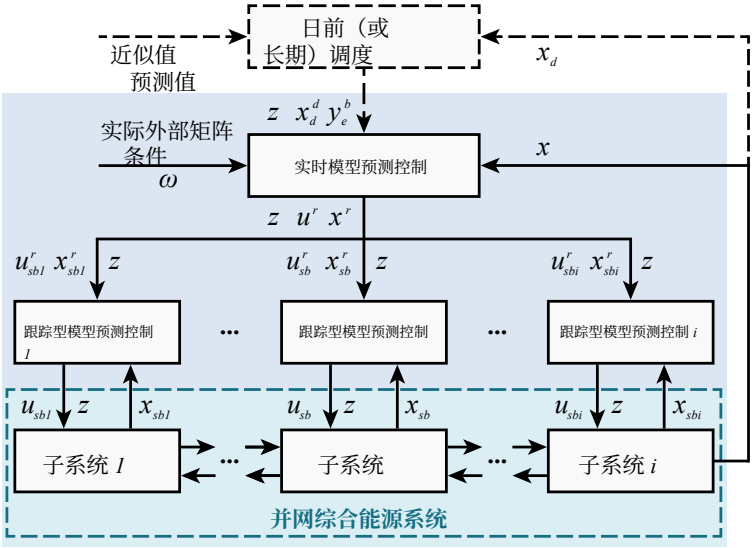

图 9：用于比较的监督式模型预测控制架构。

由于集中式模型预测控制不适用于复杂的综合能源系统，本研究采用监督式模型预测控制架构进行对比分析，如图 9 所示。该架构已广泛应用于能源系统，以优化其运行 $[31, 40, 41, 67]$。在监督式模型预测控制中，整个系统同样被划分为若干子系统。日前调度与分布式经济模型预测控制中采用的方法相同。高层实时模型预测控制通过最小化基于公式 (16) 的全局目标函数，对整个系统进行协调。根据给定的外部条件 ω 和系统状态 x，实时模型预测控制将评估整个系统输入和状态的最优轨迹，即 u^r 和 x^r。随后，将这些轨迹作为预设参考值，分配给彼此之间不进行通信的局部跟踪模型预测控制器。底层分散式跟踪模型预测控制器被视为各自子系统的局部调节器。根据新的子系统反馈 x_{sb}，局部模型预测控制器通过最小化局部跟踪目标函数，跟踪各自的参考值 u_{sb}^r 和 x_{sb}^r，从而确定进入子系统的最终输入 u_{sb}。为了进行对比分析，我们为监督式模型预测控制引入了以下三种不同的子系统配置：

(a) 子系统严格按照所提出的垂直-水平子系统分解结果进行划分；

(b) 子系统按运行单元进行划分：燃料电池、与吸收式制冷机配套的微型燃气轮机、电制冷机、蓄冷装置和电池组分别作为独立子系统；

（c）通过考虑各单元是用于发电还是供冷来对系统进行分解：一个子系统由燃料电池、微型燃气轮机和电池组组成；

另一个子系统由吸收式制冷机、电制冷机和蓄冷装置组成。

为方便起见，将所提出的分布式经济模型预测控制（DEMPC）称为问题1（或P1），将基于子系统配置(a)的监督层MPC称为问题2（或P2），将基于(b)的监督层MPC称为问题3（或P3），将基于(c)的监督层MPC称为问题4（或P4）。

5.2 参数和场景设置

对于所提出的分布式经济模型预测控制，采样时间和预测时域列于表5。具体而言，日前阶段的采样时间和优化时域分别设为1小时和24小时。分布式经济模型预测控制中的迭代次数上限 c_{max} 和收敛阈值 ψ 分别设为$c_{max} = 12$ 和 $\psi = 5\%$。对于作为对比的监督层MPC，实时模型预测控制的采样时间为60秒，局部跟踪模型预测控制器的采样时间为5秒，与分布式经济模型预测控制相同。实时模型预测控制的预测时域也为12。局部跟踪模型预测控制器的预测时域为10或12，基本沿用快速经济模型预测控制器的设置。

表5：分布式经济模型预测控制的采样时间和预测时域

经济模型预测控制器	Slow	快速 1	快速 2	快速 3
采样时间（秒）	60	5	5	5
预测时域	12	10	12	10

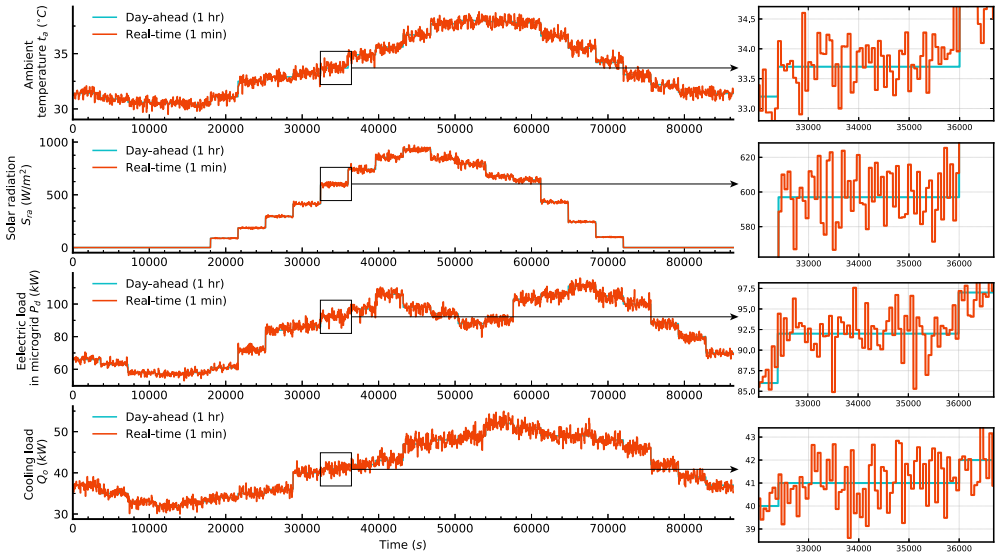

图10：外部条件随时间的变化：日前调度中使用的日前预测曲线；实时控制中使用的实际实时曲线，即问题1-4。

以下模拟中，图10展示了24小时内外部条件的变化，包括环境温度 t_a 和太阳辐射 S_{ra}、电力和

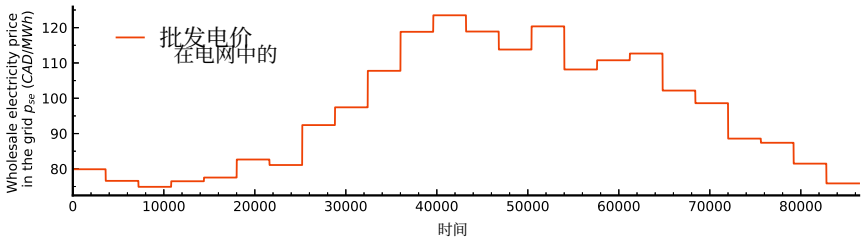

图11：电网中的批发电价。

微电网中的冷却需求 P_d 和 Q_o 。日前曲线和实时曲线的时间分辨率分别为1小时和1分钟。所有实时曲线均服从高斯分布，并在相应日前曲线约 ±6%的范围内随机分布。图11显示了典型运行日电网 p_{se} 的批发电价。微电网p_{mg} 的电价设为80加元/MWh。天然气价格p_f 为0.2加元/kg。上述价格参考了 2021 [68, 69]年夏季加拿大安大略省的相关价格。并假设电网提供的补偿和罚款，即 p_{cm} 和 p_{pn}，与批发电价 p_{se}以及 $p_{cm} = 1.5p_{se}$、 $p_{pn} = 1.5p_{se}$相关。

5.3 案例1：提供25%的可用调节容量

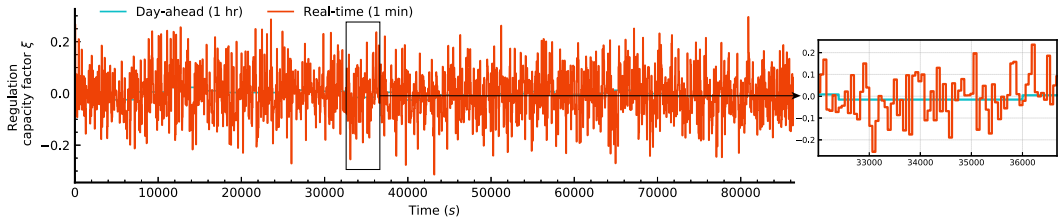

图12：案例1中调节因子的时间演变 ξ：日前调度中使用的日前预测因子；问题1-4中使用的实际实时因子。

为考察问题1-4的性能，我们将问题1-4应用于综合能源系统，使其能够为电网提供约 ±25% 的可用调节容量。在这种情况下，综合能源系统将根据实时指令向电网输送电力。如果电网所需电力高于计划基准功率 y_e^b，综合能源系统就会增加输送的电力；如果电网所需电力低于 y_e^b，则会减少输送的电力。供电的可调范围约为基准功率水平 y_e^b上下各 25%，即调节因子 ξ 基本满足 $\xi \in [-25\%, 25\%]$。 ξ 的变化情况如图12所示，其中日前曲线和实时曲线的时间分辨率分别为 1 小时和 1 分钟。实时调节因子分布在日前预测值附近，并服从高斯分布。

仿真　　案例1的结果如图13-15所示。如图13所示，电网

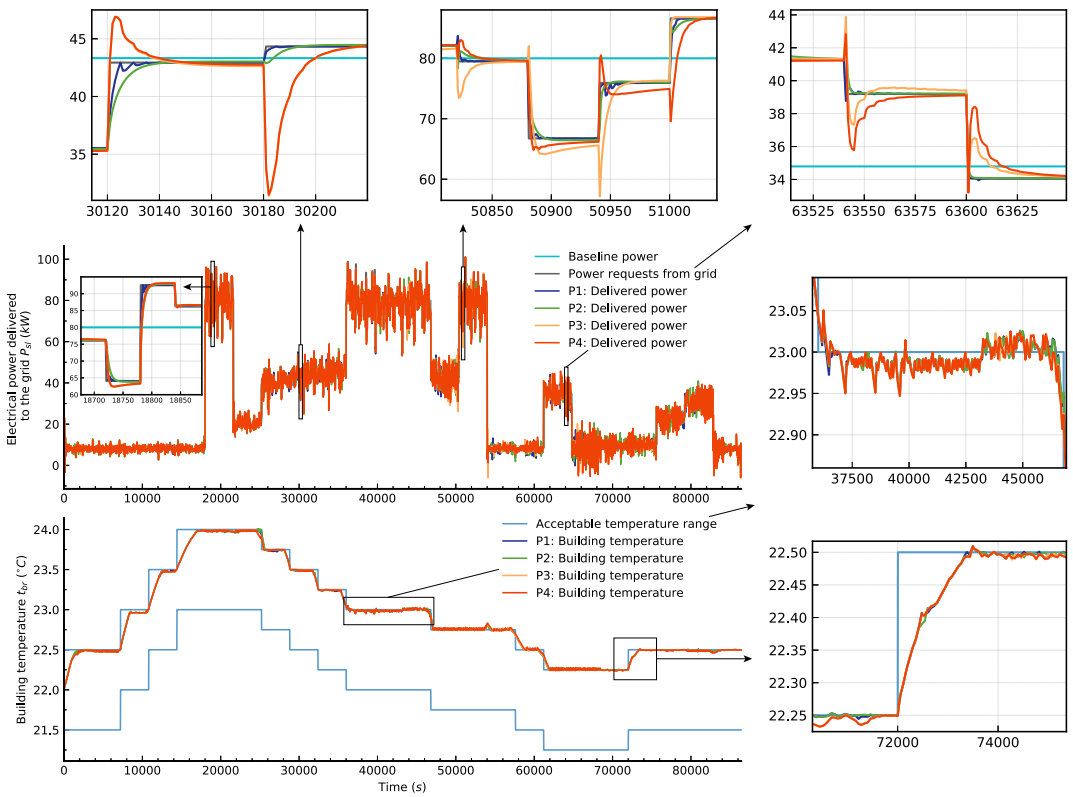

图13：案例1：问题1-4下输送至电网的功率（上）和建筑温度（下）。

会随机要求综合能源系统在运行期间调节其送出功率。例如，在基准功率为 $y_e^b = 80$ kW 时，综合能源系统需要在 18780 s 将供电功率从约 65 kW 提高至约 93 kW。在此类电网响应过程中，所提出的分布式经济模型预测控制，即问题1，在跟踪电网实时增减送出功率指令方面表现出色。基于所开发子系统配置的上层MPC（问题2）性能逊于问题1，但在精确控制供电量方面仍优于问题3和问题4。基于经验分解的上层MPC（问题3和问题4）表现相对较差，无法精确跟踪变化的功率指令，有时甚至在下一个指令到来之前都无法达到当前规定的功率点。就建筑温度而言，问题1-4基本满足客户将室内温度保持在允许范围内的需求。此外可以看出，所有这些控制方案都使建筑温度接近其上界，以节约能源和成本，类似于 [70]。

图14展示了各运行单元的动态行为，以及它们产生或消耗的电力或制冷功率。可以看出，问题1-4中的单元具有相似的功率输出轮廓，因为它们采用相同的日前调度。然而，如果我们查看

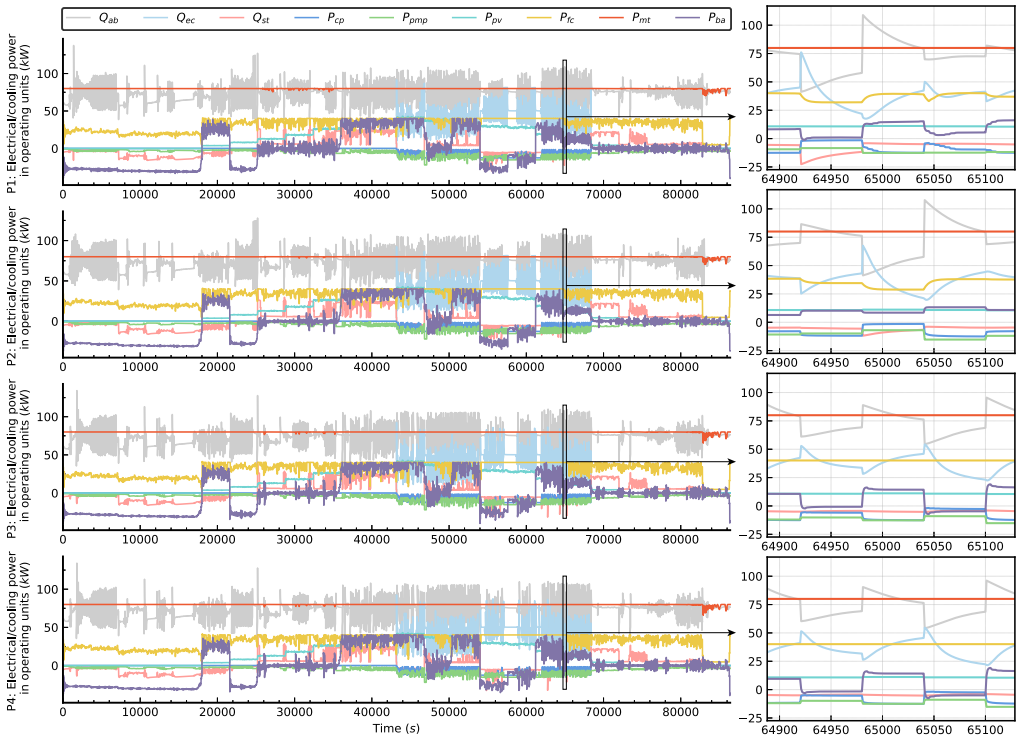

图14：案例1：问题1-4中各运行单元的发电量或冷却量（自上而下）。

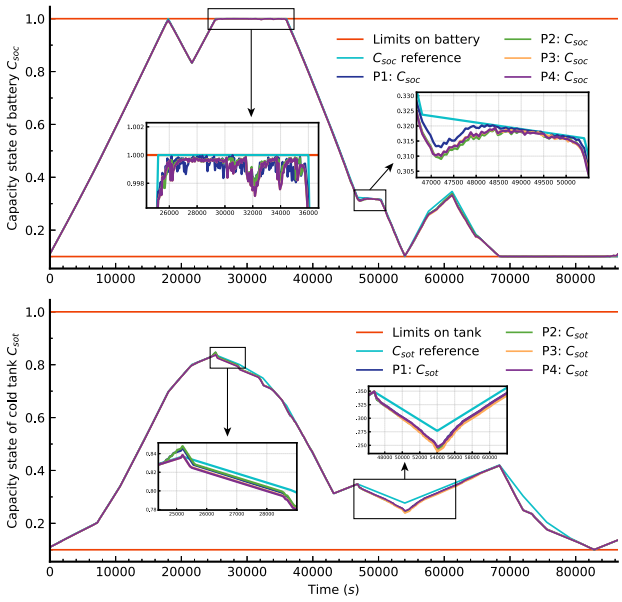

图15：案例1：　储能的容量状态：电池组（上）；蓄冷（下）　.

放大图，可以发现问题1中的单元在暂态过程中进行了更精确的调节。具体而言，各单元在动态行为中发挥互补作用，即单元之间存在协同作用，例如电力侧的燃料电池、电池和压缩机，

以及冷却侧的吸收式制冷机、电制冷机和蓄冷装置。此外，从图15可以看出，所有这些控制策略都能紧密跟踪长期负荷转移所设定的储能参考值。这也证明，无论系统采用哪种控制器，实时控制中都不会过度或不足使用储能。以上观察结果表明两点：(a) 监督式模型预测控制器和所提出的分布式经济模型预测控制能够有效管理综合能源系统，而所提出的分布式经济模型预测控制与子系统划分进一步提升了系统的动态性能；(b) 性能提升并非归功于某个特定运行单元，而是所有单元协同作用的结果，这使所提出的方法有别于现有研究中开发的方法 [71]。

为量化问题1-4之间的差异，我们根据式(16)中的控制目标建立以下性能评估准则：

$$E_p = \sum_{k=1}^{N_{sd}} J_1^{\frac{1}{2}}(k) \tag{31a}$$

$$E_t = \sum_{k=1}^{N_{sd}} \Delta y_2(k) \tag{31b}$$

$$E_e = \sum_{k=1}^{N_{sd}} -J_3(k) + \Delta C_{es} \tag{31c}$$

$$E_{glb} = \beta_1 E_p + \beta_2 E_t - \beta_3 E_e \tag{31d}$$

其中， E_p 表示供电量跟踪偏差之和； N_{sd} 为仿真时长； E_t 表示建筑温度的总跟踪偏差，其中 $\Delta y_2(k)$表示实际室内温度与允许范围之间的距离，即若 $y_2(k) \in [y_{sp,t}^{min}(k)\, y_{sp\,t}^{max}$，则$(k)]$， $\Delta y_2(k) = 0$；否则， $\Delta y_2(k) = min\{\|y_2(k) - y_{sp\,t}^{min}$，$(k)\|$， $\|y_2(k) - y_{sp\,t}^{max}$，$(k)\|\}$；$E_e$ 表示总利润，其中 ΔC_{es} 表示运行日结束时储能单元中未使用储能所造成的成本； E_{glb} 反映系统运行的全局性能，其中 $\beta_1 = 0.05$、 $\beta_2 = 3.5$ 和 $\beta_3 = 10$ 为归一化因子。对于这些指标，较小的 E_p 和 E_t 表示对电网请求的快速响应以及满足客户冷却需求方面的性能更佳。较大的 E_e 意味着更高的经济收益。较小的 E_{glb}表示整体运行性能更优。

表6展示了案例1中问题1-4所得的性能指标。从表中可以看出，问题1能够显著降低相对于电网实时指令的电力偏差，同时略微提升系统的盈利能力。问题2在系统经济性和供电功率的精准控制方面表现欠佳。此外，在满足客户冷却需求方面，问题1与问题2和问题3表现相当。因此，问题1的整体表现约

表6：案例1中问题1-4的性能评估

案例1	E_p	E_t	E_e	E_{glb}
P1	10247	380	74.9	1093.7 (38.5%)
P2	28908.1	381.6	72.4	2056.9 (72.4%)
P3	41689.1	384	71.3	2715.7 (95.5%)
P4	41250.6	427.2	71.5	2842.2 (100%)

高于问题3和问题4的60%，而问题2的表现则比问题3和问题4高出约25%。这些定量数据表明，所提出的子系统分解方法和分布式协作框架在快速响应电网请求和提升盈利能力方面具有有效性和优越性。

5.4 案例2：不参与电网响应

在实际应用中，综合能源系统的管理者也可能决定根据预先规划的功率基线而非电网的实时指令向电网输送电力。此时，运行日内的调节因子 ξ 始终设为 0。在这种情况下，问题1-4的仿真结果如图16和图17所示。

从图16可以看出，问题1基本能够使输送至电网的电力保持在基线水平；问题2的表现逊于问题1，但略优于问题3和问题4。即使一小时内的功率基线保持不变，由于问题3和问题4缺乏系统协同，必须应对外部条件和本地客户需求的频繁变化，综合能源系统跟踪基线的表现也会有所下降。同时，在所有这些控制框架下，建筑温度基本都保持在允许范围内。如图17所示，与案例1类似，问题1下的运行单元在暂态过程中仍以动态互补、协同的方式运行。值得注意的是，由于综合能源系统不再需要响应电网请求，系统不确定性随之降低，因此各单元的电力或制冷功率波动小于案例1中的波动。

表7：案例2中问题1-4的性能评估

案例2	E_p	E_t	E_e	E_{glb}
P1	6786.1	346	65.9	891.4 (44.1%)
P2	22151.1	330.3	64.5	1618.8 (80.1%)
P3	27413.4	395.2	63.9	2114.5 (104.6%)
P4	27121.5	373.9	64.3	2021.4 (100%)

表7列出了　　案例2中问题1-4的评价指标。问题1表现突出　　-

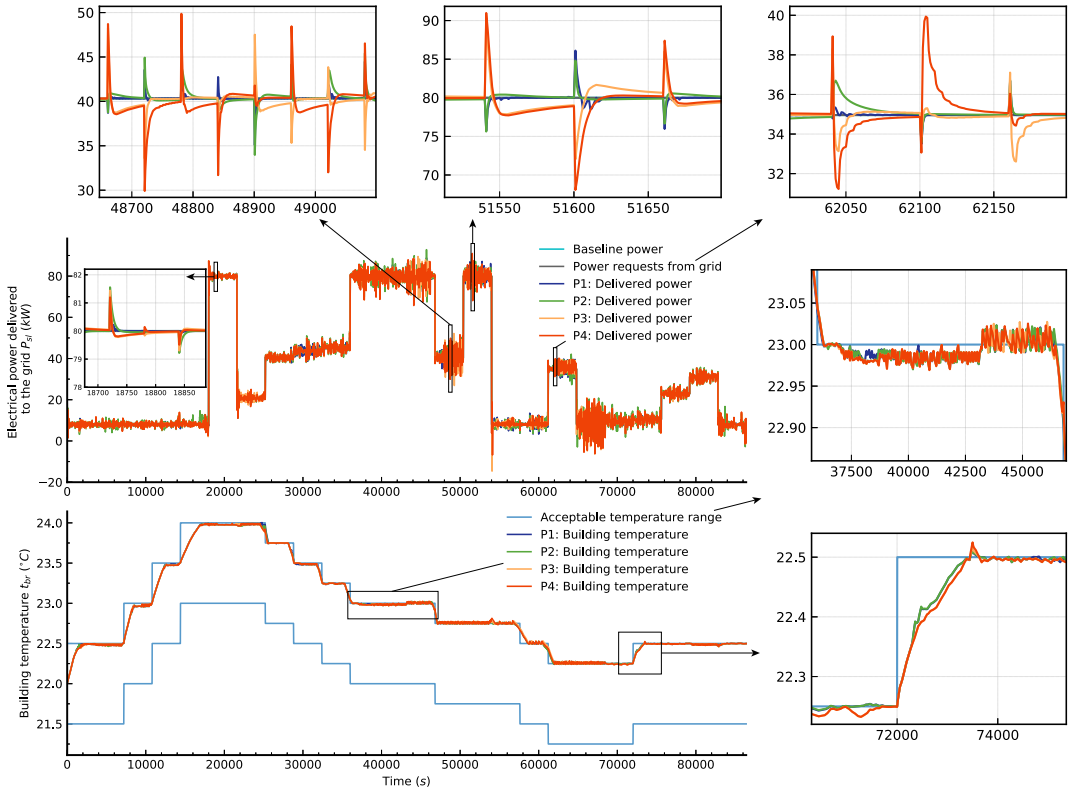

图16：案例2：问题1-4下输送至电网的功率（上）和建筑温度（下）。

在电力相关指标上的表现，这表明问题1能够准确跟踪功率基线，同时克服外部条件的变化。问题1在满足室内温度要求和系统盈利能力方面的表现略优于问题3和问题4。问题2在各方面的表现也略胜于问题3和问题4。因此，问题1使综合能源系统的整体表现提升约55%，问题2则提升约20%。这些结果表明，所提出的子系统划分和分布式经济模型预测控制仍然有效且稳健，并能在综合能源系统不参与电网响应时提升系统性能。此外，我们还注意到，所有指标都低于案例1中的指标。由于控制系统无需考虑电网发出的时变功率指令，电力和制冷指标有所下降。然而，由于失去了对电网响应的补偿，系统收益也有所下降。需要指出的是，电网响应的重要性不仅在于提高综合能源系统的经济收益，也在于增强电网的可靠性和灵活性。

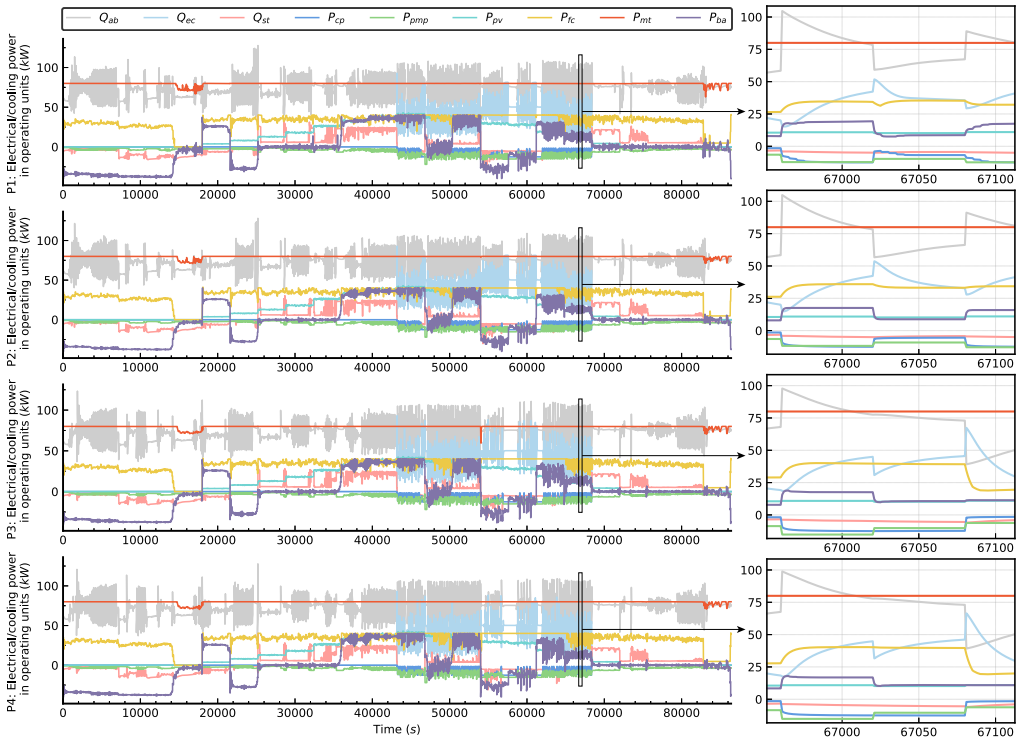

图17：案例2：问题1-4中各运行单元的发电量或冷却量（从上到下）。

5.5 案例3：提供不同的可用调节容量

为探究不同工作条件下的系统性能，我们允许综合能源系统向电网提供0%至30%的可用调节容量，以参与电网响应。可用调节容量为25%和0%的情况已在案例1和案例2中讨论。图18和图19分别展示了可用调节容量为15%和30%时的仿真结果。

如图18和图19所示，在问题1-4中，可用调节容量为15%和30%时的系统行为与案例1中的表现相似。由于运行单元之间紧密协作，问题1在即时响应电网请求方面优于其他控制器。得益于所提出的子系统配置，问题2在跟踪电网实时指令方面仍优于问题3和问题4。与此同时，问题1-4在满足将室内温度维持在客户期望范围内的需求方面表现相近。当可用调节容量为30%时，我们发现综合能源系统偶尔无法满足电网对供电功率的要求，例如在42700 s时。这是因为在给定的当前外部条件下，电网要求增加或降低供电功率的指令可能已经超出系统运行的限制。在这一特定情况下，综合能源系统必须首先尽可能放宽对

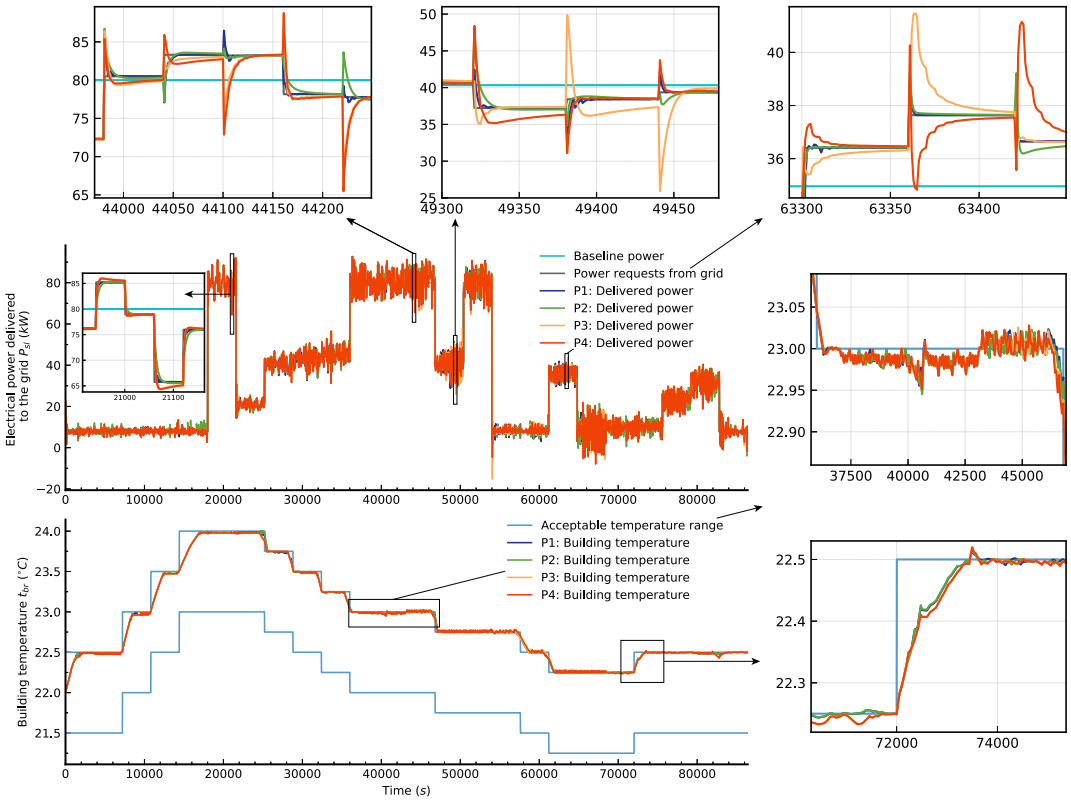

图18：案例3（可用调节容量为15%）：问题1-4下输送至电网的功率（上）和建筑温度（下）。

建筑温度的要求，以调节发电量。因此，我们可以看到，在约42700 s时，室内温度已超过上界。在其他关于电网响应的现有研究中也观察到了类似现象，参见 [72]。

图20描述了评价指标随可用调节容量变化的情况。从图中可以发现，首先，随着可用调节容量增加，所有控制器下的功率偏差指标 E_p 均呈上升趋势。这一趋势符合预期，因为提供更大的调节容量要求控制器具备更强的能力，以协调整个系统精确跟踪电网快速变化的指令。在这方面，所提出的分布式经济模型预测控制明显优于其他控制器。基于所提出的子系统配置构建的控制框架问题2始终优于问题3和问题4，尽管它们与问题2采用相同的控制架构。此外，在问题3或问题4下，当可用容量从0%增加到5%时， E_p 明显上升。这表明，当综合能源系统开始参与电网响应时，基于经验分解的问题3或问题4在精确控制发电功率方面不够稳健。其次，所有控制策略在满足冷却需求 E_t这一指标上的表现相近。可用容量超过25%后， E_t 急剧上升，这是因为有时

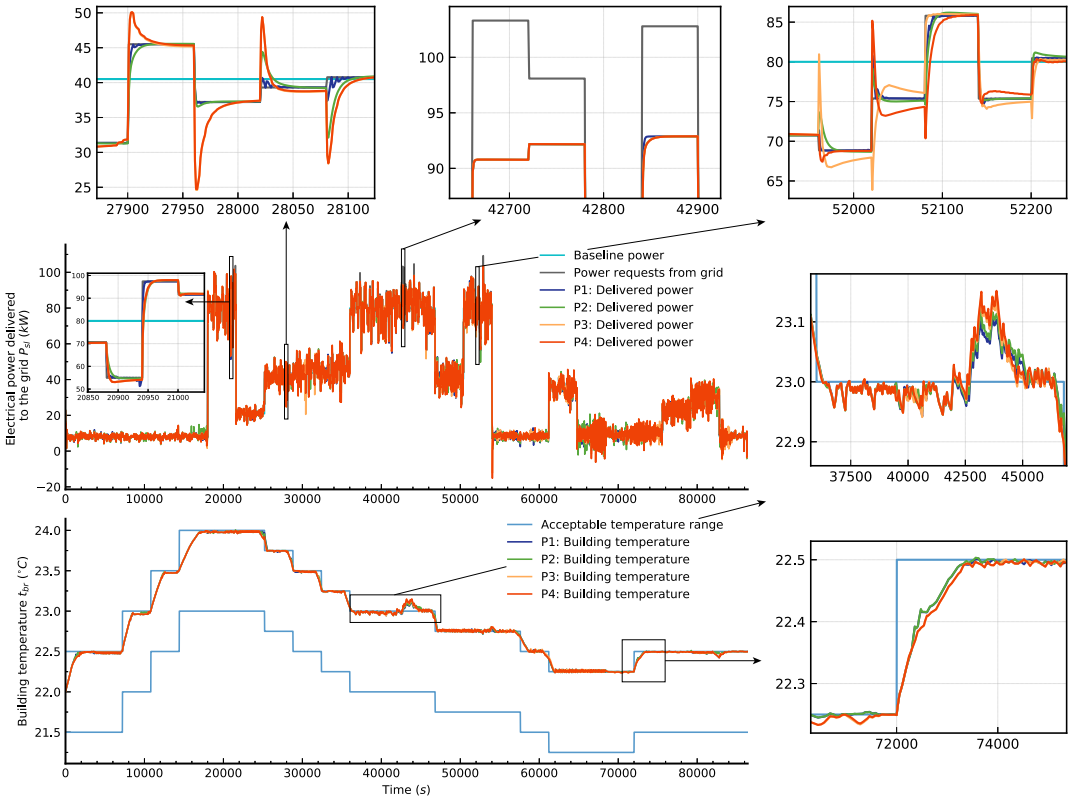

图19：案例3（可用调节容量为30%）：问题1-4下输送至电网的功率（上）和建筑温度（下）。

ξ 超出系统能力范围。关于系统盈利能力 E_e，如图所示，可用调节容量越大，收益越高，因为电网响应会带来补偿。问题3或问题4下的系统收益略低于问题2，而问题2低于问题1。此外，可用容量超过25%后，E_e 的上升趋势放缓，因为综合能源系统有时无法响应电网请求，因此会受到更多罚款。最后，综合能源系统的总体性能指标 E_{glb} 随着可用容量增加而提高，这表明，提供更高可用容量的综合能源系统需要采用出色的控制策略，以确保性能稳定。如图所示，问题3和问题4的表现不如问题2。这种性能下降证明，所提出的子系统分解有助于实现综合能源系统的最优模块化管理。所提出的分布式经济模型预测控制优于问题2，体现了分布式经济模型预测控制在挖掘运行单元间协同作用潜力方面的优势。因此，分布式经济模型预测控制能够更精确地按照电网请求控制供电功率，同时提高系统收益并维持建筑温度。

关于仿真期间快速经济模型预测控制器的迭代次数，达到的最小和最大迭代次数分别为 2 次和 12 次。快速经济模型预测控制器的平均迭代次数为

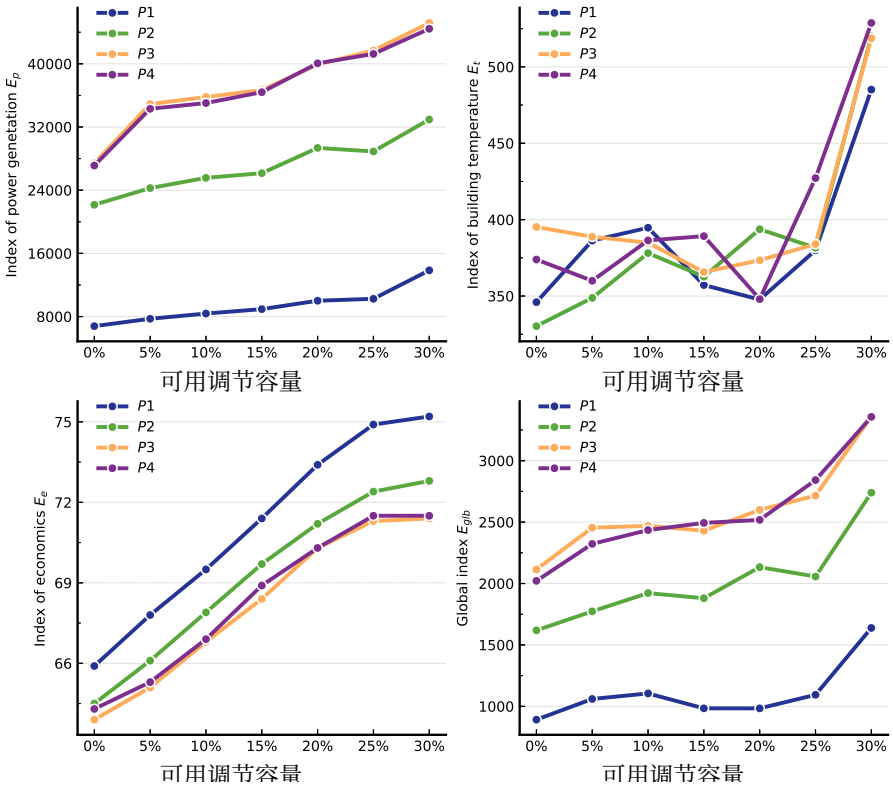

图20：可用调节容量变化时的评价指标： E_p （左上）、 E_t （右上）、 E_e （左下）、 E_{glb} （右下）。

表8：快速经济模型预测控制器的平均迭代次数

可用调节容量	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%
平均迭代次数	2.315	2.313	2.324	2.333	2.350	2.349	2.354

也在表8中进行了研究。可以看出，在多种工作条件下，平均迭代次数约为 2.3 次。分布式经济模型预测控制的这种稳定收敛性表明其具有实际应用价值。

6 结论

综合能源系统通常具有提升电网可靠性和灵活性的潜力。然而，综合能源系统中各运行单元之间紧密的互联关系和交互作用，不利于设计合适的实时控制方案。为应对其动态和结构复杂性，我们提出了一种基于综合能源系统有向图表示的系统化子系统分解方法。通过该方法，依据动态时间尺度对整个综合能源系统进行垂直分解，并依据各单元之间的互连紧密度进行横向分解。此外，分解的定性分析表明，对于综合能源系统，垂直分解应

首先进行，以在每个子系统内建立一致的时间尺度，然后再进行横向分解。这种分解顺序更有利于为综合能源系统设计分布式协作方案。基于这一结论，我们提出了一项面向控制的基本准则，用于将复杂能源系统分解为最优子系统。利用分解后的子系统，我们开发了一种可扩展的协同分布式经济模型预测控制方法，以全局目标提升响应能力，同时满足冷却和经济要求。在该分布式经济模型预测控制方法中，多个本地智能体依次并迭代地协作，充分利用各单元，实现全系统协同。

大量仿真结果表明，所提出的子系统分解与分布式协作框架具有适用性和有效性。无论综合能源系统（IES）是否参与电网响应，基于所提出的子系统配置的控制策略均优于基于经验分解的同类控制架构。得益于各运行单元之间的协作，所开发的分布式经济模型预测控制（DEMPC）进一步显著提升了系统的动态性能，尤其是在满足电网请求、精准控制发电功率方面。对综合能源系统在变化工况下的研究表明，与基于经验分解的控制相比，所提出的分解与协作方案在综合能源系统为电网提供多种调节容量时具有更强的适应能力。此外，我们发现，可用调节容量越大、电网响应程度越深，对协调控制系统的要求就越高。有效的控制策略对于实现精准、深入的电网响应至关重要。超出系统能力范围的过大调节容量会导致综合能源系统整体性能明显下降，这也意味着供给电网的电能质量恶化，且综合能源系统的经济性停滞不前。

7 致谢

本研究得到中国国家自然科学基金（项目编号：51936003）、中国国家重点研发计划（项目编号：2022YFB4100403）和中国国家留学基金管理委员会的资助。第二作者 X. Yin 感谢新加坡教育部通过其学术研究基金一级项目（RS63/22）以及新加坡南洋理工大学（启动经费）提供的资助。

参考文献

[1] J Ramsebner、R Haas、H Auer、A Ajanovic、W Gawlik、C Maier、S Nemec-Begluk、T Nacht 和 M Puchegger。从单一能源电网到多能源与混合电网：历史发展与未来

展望。《可再生与可持续能源评论》，151:111520，2021。[2] Douglas J Arent、Shannon M Bragg-Sitton、David C Miller、Thomas J Tarka、Jill A Engel- Cox、Richard D Boardman、Peter C Balash、Mark F Ruth、Jordan Cox 和 David J Garfield。多输入多输出混合能源系统。*Joule*，5(1):47–58，2021。[3] Rui Jing、Yue Zhou 和 Jianzhong Wu。综合能源系统。材料科学与材料工程参考模块，2022。[4] Dan Wang、Liu Liu、Hongjie Jia、Weiliang Wang、Yunqiang Zhi、Zhengji Meng 和 Bingyu Zhou。综合能源配电系统相关关键问题综述。中国电机工程学会电力与能源系统学报，4(2):130–145，2018。[5] Pavitra Shar ma、Hitesh Dutt Mathur、Puneet Mishra 和 Ramesh C Bansal。微电网能源管理策略的批判性比较综述。*Applied Energy*，327:120028，2022。[6] Han Li、Zhe Wang、Tianzhen Hong 和 Mary Ann Piette。住宅建筑的能源灵活性：表征与量化方法及其应用的系统综述。应用能源进展，3:100054，2021。[7] Joannah I Otashu 和 Michael Baldea。面向调频的化学过程调度。*Applied Energy*，260:114125，2020。[8] Yangyang Fu、Zheng O'Neill、Jin Wen、Amanda Pertzborn 和 Steven T Bushby。利用商用供暖、通风与空调系统提供电网服务：综述。*Applied Energy*，307:118133，2022。[9] Daniele Groppi、Antun Pfeifer、Davide Astiaso Garcia、Goran Krajaˇci´c 和 Neven Dui´c。智能能源岛中的储能与需求侧管理解决方案综述。《可再生与可持续能源评论》，135:110183，2021。[10] Christopher J Bay、Rohit Chintala、Venkatesh Chinde 和 Jennifer King。面向协调型电网交互建筑的分布式模型预测控制。*Applied Energy*，312:118612，2022。[11] Huilong Wang、Shengwei Wang 和 Rui Tang。电网响应型建筑的发展：非住宅建筑中的暖通空调系统通过快速需求响应向智能电网提供辅助服务的机遇、挑战、能力与应用。*AppliedEnergy*，250:697–712，2019。

[12] Manasseh Obi、Tylor Slay 和 Robert Bass。利用客户自有设备进行分布式能源资源聚合：文献与标准综述。*Energy Reports*，6：2358– 2369，2020年。[13] Alexander W Dowling、Ranjeet Kumar 和 Victor M Zavala。电力市场参与的多尺度优化框架。*Applied Energy*，190：147–164，2017年。[14] Jianxiao Wang、Haiwang Zhong、Ziming Ma、Qing Xia 和 Chongqing Kang。多能源系统中综合需求响应的回顾与展望。*Applied Energy*，202：772–782，2017年。[15] Xian Gao、Bernard Knueven、John D Siirola、David C Miller 和 Alexander W Dowling。综合能源系统与电力市场交互作用的多尺度仿真。*AppliedEnergy*，316：119017，2022年。[16] Peng Li、Zixuan Wang、Jiahao Wang、Tianyu Guo 和 Yunxing Yin。分布式综合能源系统的多时空尺度优化运行策略。*Applied Energy*，289：116698，2021年。[17] Xiaolun Fang、Wei Dong、Yubin Wang 和 Qiang Yang。氢能多能源微电网的多时间尺度能源管理策略。*Applied Energy*，328：120195，2022年。[18] Chunming Liu、Chunling Wang、Yujun Yin、Peihong Yang 和 Hui Jiang。考虑动态响应性能的社区综合能源系统模型预测控制双层调度与控制策略。*Applied Energy*，310：118641，2022年。[19] Yuxiao Qin、Pei Liu 和 Zheng Li。考虑系统惯性的综合能源系统多时间尺度分层调度。*Renewable and Sustainable Energy Reviews*，169：112911，2022年。[20] Yang Li、Meng Han、Mohammad Shahidehpour、Jiazheng Li 和 Chao Long。考虑综合需求响应的可再生能源发电不确定条件下社区综合能源系统数据驱动的分布鲁棒调度。*Applied Energy*，335：120749，2023年。[21] Peng Li、Zixuan Wang、Jiahao Wang、Weihong Yang、Tianyu Guo 和 Yunxing Yin。考虑多重不确定性和综合需求响应的综合能源系统两阶段优化运行。《能源》，225：120256，2021年。

[22] Michael Baldea 和 Iiro Harjunkoski. 集成生产调度与过程控制：系统性综述. *Computers & Chemical Engineering*, 71:377–390, 2014.[23] Alexander W Dowling 和 Victor M Zavala. 调频市场为工业系统带来的经济机遇. *Computers & Chemical Engineering*, 114:254–264, 2018.[24] Long Wu、Xunyuan Yin、Lei Pan 和 Jinfeng Liu. 综合能源系统的经济模型预测控制：多时间尺度框架. *Applied Energy*, 328:120187, 2022.[25] Yuhui Jin、Xiao Wu 和 Jiong Shen. 利用多时间尺度分布式预测控制实现离网能源供应多能源系统的电热协同控制. 《能源》, 254:124336, 2022.[26] Xuanang Lei、Yujun Lin、Qiufan Yang、Jianyu Zhou、Xia Chen 和 Jinyu Wen. 基于可再生能源的热电站系统协调控制研究. *Applied Energy*, 324:119736, 2022.[27] Xunyuan Yin 和 Jinfeng Liu. 双时间尺度非线性系统的分布式移动时域状态估计. 《自动化》, 79:152–161, 2017.[28] Biao Zhang、Daniel Maloney、Nor Farida Harun、Nana Zhou、Paolo Pezzini、Anudeep Medam、Rob Hovsapian、Samuel Bayham 和 David Tucker. 综合固体氧化物燃料电池—燃气轮机（固体氧化物燃料电池—燃气轮机）能源系统的快速负荷切换：电网响应潜力的示范. 《能源转换与管理》, 258:115544, 2022.[29] JE Paiva 和 AS Carvalho. 面向现代电网的基于可再生能源的可控混合电力系统. 《可再生能源》, 53:271–279, 2013.[30] Huilong Wang 和 Shengwei Wang. 暖通空调系统的扰动补偿增强控制策略：在提供电网调频服务时改善建筑室内环境控制. 《可再生能源》, 169:1330–1342, 2021.[31] Andrea De Lorenzi、Agostino Gambarotta、Emanuela Marzi、Mirko Morini 和 Costanza Saletti. 需求不确定性下提升电网灵活性的热电联产厂预测控制. *Applied Energy*, 314:118934, 2022.[32] Panagiotis D Christofides、Riccardo Scattolini、David Munoz de la Pena 和 Jinfeng Liu. 分布式模型预测控制：教程式综述与未来研究方向. *Computers& Chemical Engineering*, 51:21–41, 2013.

[33] Panagiotis D Christofides、Jinfeng Liu 和 David Munoz De La Pena。《网络化与分布式预测控制：方法与非线性过程网络应用》。Springer Science & Business Media，2011 年。[34] Wei Qi、Jinfeng Liu 和 Panagiotis D Christofides。分布式风能和太阳能系统的分布式监督预测控制。《IEEE 控制系统技术汇刊》，21(2):504–512，2012 年。[35] Xiaobing Kong、Xiangjie Liu、Lele Ma 和 Kwang Y Lee。独立式风能/太阳能/电池供电系统的分层分布式模型预测控制。《IEEE 系统、人类与控制论汇刊：系统》，49(8):1570–1581，2019 年。[36] Keyong Hu、Ben Wang、Shihua Cao、Wenjuan Li 和 Lidong Wang。用于综合能源系统多时间尺度优化调度的新型模型预测控制策略。《Energy Reports》，8:7420–7433，2022 年。[37] J ames B Rawlings、Nishith R Patel、Michael J Risbeck、Christos T Maravelias、Michael J Wenzel 和 Robert D Turney。经济模型预测控制与实时决策及其在大型暖通空调能源系统中的应用。《Computers & Chemical Engineering》，114:89–98，2018 年。

[38] Sebastian Kuboth、Florian Heberle、Andreas K¨onig-Haagen 和 Dieter Br¨ uggemann. 住宅建筑热电联供能源系统的经济模型预测控制。*Applied Energy*，240:372–385，2019。

[39] Shiyu Yang、Man Pun Wan、Bing Feng Ng、Swapnil Dubey、Gregor P Henze、Wanyu Chen 和 Krishnamoorthy Baskaran。用于空调与机械通风、照明与遮阳系统集成控制的模型预测控制。*Applied Energy*，297：117112，2021。[40] Rui Tang 和 Shengwei Wang。智能电网中面向建筑需求响应的热能储存与热舒适度优化的模型预测控制。*Applied Energy*，242：873–882，2019。[41] Jean-Yves Dieulot、Fr´ed´eric Colas、Lamine Chalal 和 Genevieve Dauphin-Tanguy。混合发电厂的经济型监督预测控制。*Electric Power SystemsResearch*，127：221–229，2015。[42] Xunyuan Yin 和 Jinfeng Liu。过程网络的子系统分解：用于分布式状态估计与控制。*AIChE Journal*，65(3)：904–914，2019。

[43] Xunyuan Yin、Yan Qin、Hongtian Chen、Wenli Du、Jinfeng Liu 和 Biao Huang。基于社区检测的大规模过程分解与分布式监控。*AIChE Journal*，68(11):e17826，2022年。[44] Davood Babaei Pourkargar、Ali Almansoori 和 Prodromos Daoutidis。分解对分布式模型预测控制的影响：一个过程网络案例研究。*Industrial &Engineering Chemistry Research*，56(34):9606–9616，2017年。[45] Prodromos Daoutidis、Wentao Tang 和 Andrew Allman。基于网络结构的控制与优化问题分解：来自生物学的概念、方法与启示。*AIChE Journal*，65(10):e16708，2019年。[46] James Blake Rawlings、David Q Mayne 和 Moritz Diehl。模型预测控制：理论、计算与设计，第2卷。Nob Hill Publishing，威斯康星州麦迪逊，2017年。[47] Mahmood Khatibi、Samira Rahnama、Pierre Vogler-Finck、Jan Dimon Bendtsen 和 Alireza Afshari。基于分层模型方案设计聚合器，以激活多区域建筑物的能源灵活性。*Applied Energy*，333:120562，2023年。[48] Cara R Touretzky 和 Michael Baldea。热能储存系统的分层调度与控制策略。*Energy and Buildings*，110:94–107，2016年。[49] Mohamed Toub、Chethan R Reddy、Meysam Razmara、Mahdi Shahbakhti、Rush D Robinett III 和 Ghassane Aniba。用于优化运行并集成建筑物暖通空调系统的微型聚光太阳能发电系统的基于模型的预测控制。《能源转换与管理》，199:111924，2019年。[50] Costanza Saletti、Agostino Gambarotta 和 Mirko Morini。小型区域供热系统中预测控制器的开发、分析与应用。*Applied ThermalEngineering*，165:114558，2020年。[51] Maomao Hu、Fu Xiao、John Bagterp Jørgensen 和 Rongling Li。利用建筑物热质量进行需求响应的地板供暖系统价格响应型模型预测控制。*Applied Thermal Engineering*，153:316–329，2019年。[52] Matthew Ellis、Jinfeng Liu 和 Panagiotis D Christofides。经济模型预测控制。*Springer*，5(7):65，2017年。[53] Yi Zhang、Benjamin Decardi-Nelson、Jianbang Liu、Jiong Shen 和 Jinfeng Liu。燃煤锅炉—涡轮机发电系统的区域经济模型预测控制。*ChemicalEngineering Research and Design*，153:246–256，2020年。

[54] Mart´ın A Alarc´on、Rodrigo G Alarc´on、Alejandro H Gonzalez 和 Antonio Ferramosca。用于连接主电网的微电网能源管理的经济型模型预测控制。过程控制期刊，117:40–51，2022年。[55] Deepak Paramashivan Kaundinya、Palit Balachandra 和 Nijavalli H Ravindranath。用于分布式电力的并网与独立能源系统——文献综述。《可再生与可持续能源评论》，13(8):2041–2050，2009年。[56] 纽约独立系统运营商运营工程部。纽约独立系统运营商辅助服务手册。纽约独立系统运营商，美国纽约州伦斯勒市克雷大道10号，邮编12144，2022年。[57] Sujit Suresh Jogwar 和 Prodromos Daoutidis。集成过程网络分布式控制架构的基于社区的综合。《化学工程科学》，172:434–443，2017年。[58] Aditya Kumar、Panagiotis D Christofides 和 Prodromos Daoutidis。具有非显式多时间尺度特性的非线性过程的奇异摄动建模。《化学工程科学》，53(8):1491–1504，1998年。[59] Santo Fortunato。图中的社区检测。《物理学报告》，486(3-5):75–174，2010年。[60] Elizabeth A Leicht 和 Mark EJ Newman。有向网络中的社区结构。《物理评论快报》，100(11):118703，2008年。[61] Ulrik Brandes、Daniel Delling、Marco Gaertler、Robert Gorke、Martin Hoefer、Zoran Nikoloski 和 Dorothea Wagner。关于模块度聚类。《*IEEE*知识与数据工程汇刊》，20(2):172–188，2007年。[62] Vincent D Blondel、Jean-Loup Guillaume、Renaud Lambiotte 和 Etienne Lefebvre。大型网络中社区的快速展开。《统计力学杂志：理论与实验》，2008(10):P10008，2008年。[63] Su Liu、Jing Zhang、Jinfeng Liu、Yiping Feng 和 Gang Rong。具有异步控制器评估的分布式模型预测控制。《加拿大化学工程期刊》，91(10):1609–1620，2013年。[64] Liwei Ju、Zhe Yin、Xiaolong Lu、Shenbo Yang、Peng Li、Rao Rao 和 Zhongfu Tan。一种基于三维平衡的新型虚拟电力随机优化调度模型。

集成碳捕集、电转气和电动汽车聚合商的电厂。《能源》,324:119776, 2022.

[65] DanielMøllerSneum. 区域能源—电力系统接口中的灵活性障碍：分类法。《可再生与可持续能源评论》，145:111007，2021。

[66] Joel AE Andersson、Joris Gillis、Greg Horn、James B Rawlings 和 Moritz Diehl。Casadi：用于非线性优化和最优控制的软件框架。数学规划计算，11:1–36，2019。

[67] Wei Qi、Jinfeng Liu 和 Panagiotis D Christofides。用于综合风能/太阳能发电与海水淡化系统长期调度的监督预测控制。*IEEE* 控制系统技术汇刊，20(2):504–512，2011。

[68] 独立电力系统运营商。https://www.ieso.ca/en/。

[69] 安大略能源委员会。https://www.oeb.ca/。

[70] Rasmus Halvgaard、Niels Kjølstad Poulsen、Henrik Madsen 和 John Bagterp Jørgensen。智能电网中的建筑气候控制经济模型预测控制。载于*2012*年*IEEE PES*创新智能电网技术会议（*ISGT*），第1–6页。IEEE，2012年。

[71] Rajabu Myovela、Masaki Imanaka、Muneaki Kurimoto、Shigeyuki Sugimoto 和 Takeyoshi Kato。关于协调控制供暖、通风和空调负荷与电池储能系统以提升 FastADR 响应性能的可行性研究。*IFAC-PapersOnLine*，52(4):366–370，2019。

[72] HuilongWang、Zhikun Ding、Rui Tang、Yongbao Chen、Cheng Fan 和 Jiayuan Wang。一种基于机器学习的控制策略，用于提升暖通空调系统提供大容量调频服务的性能。*Applied Energy*，326:119962，2022。