

# 面向微电网的分布式 Nesterov 加速经济调度算法

时侠圣<sup>1,2,3,4</sup>, 吴炜<sup>1,2</sup>, 李中美<sup>4,5†</sup>

- (1. 江南大学 轻工过程先进控制教育部重点实验室, 江苏 无锡 214122;
2. 江南大学 自动化与智能科学学院, 江苏 无锡 214122;
3. 安徽大学 工业节电与用电安全省级重点实验室, 合肥 230601;
4. 华东理工大学 能源化工过程智能制造教育部重点实验室, 上海 200237;
5. 华东理工大学 信息科学与工程学院, 上海 200237)

**摘要:** 微电网分布式经济调度是实现系统经济运行的核心问题, 其目标旨在满足功率平衡与发电单元运行约束的前提下最小化总发电成本. 不同于集中式调度策略, 分布式经济调度策略无需控制中心对所有分布式节点进行信息收集, 且可扩展性强, 便于隐私保护. 针对现有分布式经济调度算法收敛速率较慢的问题, 结合 Nesterov 加速技术与原始-对偶框架, 提出一种新型分布式加速经济调度算法. 通过引入自适应对偶变量处理局部出力约束, 并设计包含原始变量与对偶变量的加速动力学方程. 理论分析表明, 所提出算法在一般凸成本函数下能够以  $O(1/t^2)$  的收敛速率达到全局最优解. 仿真结果表明, 所提出算法在稳定性方面优于现有分布式 Nesterov 经济调度算法, 能够有效实现微电网经济调度问题的快速分布式求解.

**关键词:** 分布式优化; 加速优化; 自适应对偶变量; 原始对偶策略; 微电网

中图分类号: TP273 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2025.1243

引用格式: 时侠圣, 吴炜, 李中美. 面向微电网的分布式 Nesterov 加速经济调度算法 [J]. 控制与决策

## A Nesterov-acceleration method for the distributed economic dispatch problem in microgrids

SHI Xia-sheng<sup>1,2,3,4</sup>, WU Wei<sup>1,2</sup>, LI Zhong-mei<sup>4,5†</sup>

- (1. Key Laboratory of Advanced Process Control for Light Industry, Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;
2. School of Automation and Intelligent Science, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;
3. Anhui Key Laboratory of Industrial Energy-Saving and Safety, Anhui University, Hefei 230601, China;
4. Key Laboratory of Smart Manufacturing in Energy Chemical Process, Ministry of Education, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China;
5. School of Information Science and Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

**Abstract:** The distributed economic dispatch of microgrids is a core problem in smart grids, which aims to minimize the total generation cost while satisfying power balance and operational constraints of generation units. Compared with centralized methods that rely on a central controller to collect global information from all distributed agents, the distributed economic dispatch scheme offers advantages including strong scalability, low communication overhead, and enhanced privacy preservation. To address the slow convergence rate of existing distributed economic dispatch algorithms, this paper proposes a distributed Nesterov-accelerated economic dispatch algorithm via integrating the Nesterov acceleration technique with a primal-dual framework. Specifically, the adaptive dual variable is introduced to handle local output constraints, and the dynamics of primal and dual variables are designed via the Nesterov acceleration technique. Therefore, theoretical analysis shows that the proposed algorithm can achieve the global optimal solution with a convergence rate of  $O(1/t^2)$  under generally convex cost functions. Finally, simulation results

收稿日期: 2025-12-01; 录用日期: 2026-03-05.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62403004); 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (ICT2024A01); 上海启明星计划项目 (24QA2706100); 安徽大学工业节电与用电安全省级重点实验室开放课题 (KFKT202405).

责任编辑: 刘骁康.

†通信作者. E-mail: lizhongmei@ecust.edu.cn.

本文附带电子附录文件, 可登录本刊官网该文“资源附件”区自行下载阅览.

demonstrate that the proposed algorithm outperforms existing distributed Nesterov economic dispatch algorithms.

**Keywords:** Distributed optimization; accelerated method; adaptive dual variable; primal-dual scheme; microgrids

## 0 引言

微电网作为整合分布式能源、实现局部能源自治与优化管理的单元,其经济运行效率直接决定了电力系统的可靠性与经济性.分布式经济调度问题是微电网运行中的核心优化问题,其目标是在满足系统总负荷需求与各分布式发电单元运行约束的前提下,实现总发电成本的最小化<sup>[1]</sup>.随着现代电力系统结构向分布式、智能化方向发展,发电侧大量分布式能源的接入对调度模式提出了更高要求<sup>[2]</sup>.相较于集中式经济调度策略,分布式经济调度策略亦存在收敛速率慢、算法复杂等不足.但在微电网这一典型系统中,传统的集中式调度方法严重依赖于中心节点(控制器)对全局信息的收集与计算,在系统规模扩大或通信受限时面临计算负担重、单点故障风险及隐私保护等挑战<sup>[3-8]</sup>.因此,分布式经济调度策略受到广泛关注<sup>[9,10]</sup>.早期的分布式经济调度算法主要解决“经济调度问题分布式求解”的问题,其核心思想是利用对偶分解将全局的供需平衡约束分解到各个智能体的局部子问题中,并通过平均一致性协议来协调对偶变量,使其最终收敛到一致的最优值<sup>[11]</sup>.从设计范式角度,现有算法主要分为基于离散时间迭代算法和基于连续时间动力学算法<sup>[12]</sup>.

在离散时间经济调度算法方面, Yang 等<sup>[13]</sup>利用平均一致性策略分布式估计全局对偶梯度,并针对对偶变量设计基于固定常数步长的梯度下降策略,确保各发电机组获得最优输出功率.然而该文献所采用的矩阵摄动分析方法仅对二次成本函数有效,无法直接推广至一般凸成本函数.针对带有一般凸成本函数的经济调度问题,王等<sup>[14]</sup>设计了一种动态功率约束生成策略,该策略能动态修改局部优化过程中的功率约束,避免了可转移负荷和购电功率集中参与.然而,该算法需要邻居节点交互功率值,降低了系统隐私性.为此, Lv 等<sup>[15]</sup>利用“推和”(push-sum)技术设计一类新型分布式优化算法,节点间仅需交互对偶变量,并采用小增益理论证实了所设计算法在固定步长下的收敛性.为了解决更一般约束下的分布式经济调度问题, Deng 等<sup>[16]</sup>将分布式经济调度问题转化为单调算子的零点问题,并利用 Tseng 分裂算子设计一个通用的分布式优化算法.由于该方法采用一种前向-后向算子分裂算法,故该方法需要更多的通信消耗.可以发现,上述已有算法都对成本函数提出一定的要求,强凸或者 Lipschitz 连

续.为提高算法的普适性, Huang 等<sup>[17]</sup>利用原始对偶策略和事件触发通信机制设计一类基于映射算子的分布式优化算法,且该算法收敛速率为  $O(\frac{1}{t})$  ( $t$ 为算法更新时刻).为提高算法的收敛速率,王轶楠等<sup>[18]</sup>利用快速一致性设计一类基于动量加速的精确一阶一致性跟踪算法,并利用矩阵收缩理论证实所设计算法的指数收敛特性.但该结论仅适用于无局部约束的分布式经济调度问题,无法直接推广至带发电输出功率约束的分布式经济调度问题.可以发现,上述已有算法多采用差分方程去描述算法迭代过程.相比于基于差分方程的离散时间算法,基于微分方程的连续时间算法在近年来由于其更容易收敛性分析,进而得到广泛的关注<sup>[19]</sup>.例如, Lyapunov 稳定性理论、凸优化理论等<sup>[20]</sup>.

在连续时间经济调度算法方面,基于多智能体系统一致性理论,微电网分布式经济调度问题在最近十年得到深入研究<sup>[21]</sup>.例如, Yi 等<sup>[22]</sup>分别利用投影算子和微分投影算子设计两种初始自由的分布式连续时间算法,用于求解带有局部可行性约束的分布式经济调度问题,确保在动态网络中可实现“即插即用”运行.然而,文献所设计算法仅在无约束情况下给出指数收敛速度,一般约束下的收敛速率未明确收敛速度上界.为此, Deng 等<sup>[23]</sup>利用状态解耦分析微分映射算子下的原始对偶分布式经济调度算法,证实该算法在光滑且强凸成本函数下具有指数收敛特性.此外, Zhu 等<sup>[24]</sup>利用设计一种基于输出反馈的分布式优化算法,使用投影算子替换微分算子,降低了算法的计算复杂度.不同于上述投影算子或者微分投影算子, Jia 等<sup>[25]</sup>利用惩罚函数法将节点局部约束转移至成本函数中,并设计一种基于梯度的自适应分布式优化算法,在满足初始功率约束的情形下实现经济调度问题分布式求解.为取消上述算法的初始状态约束, Li 等<sup>[26]</sup>通过对偶变量将节点局部约束进行拉格朗日函数建模,然后构建一种自适应分布式原始对偶算法,其中对偶变量采用平方项确保其非负性.并且证实所设计算法针对无局部约束经济调度问题具有指数收敛特性. Teng 等<sup>[27]</sup>针对港口微电网系统的分布式经济调度问题设计一种具有隐私保护机制的分布式原始对偶算法,确保攻击者无法从被掩盖的信息中识别出真实的发电机初始状态.此外,不同场景及需求下的算法亦被设计出来,包括:不确定通讯拓扑下的经济调度算法<sup>[28]</sup>、考虑通信时

延的优化算法<sup>[29,30]</sup>、事件触发通信机制优化算法<sup>[31]</sup>、量化通信算法<sup>[32]</sup>等。然而,上述算法都只能实现 Lyapunov 大范围渐近收敛或 $O(\frac{1}{t})$ 收敛。

近年来,随着微电网智能化进程的推进,如何设计更快的分布式优化算法得到广大学者的关注<sup>[33,34]</sup>。如动量加速、Nesterov 加速技术等。例如, Liu 等<sup>[35]</sup>将动量加速技术与分布式梯度跟踪法结合,针对分布式聚合博弈优化算法问题设计一类加速算法。众所周知, Nesterov 加速可将无约束优化算法收敛速率提高至 $O(\frac{1}{t^2})$ ,因而受到深入研究。例如, Lin 等<sup>[36]</sup>将 Nesterov 技术应用于有向网络下的分布式无约束优化问题,并在梯度跟踪项中添加尺度因子,对网络不平衡下的一致性误差进行抑制。Liu 等<sup>[37]</sup>等针对带有局部约束的分布式凸优化问题设计一种基于逼近算子的 Nesterov 加速算法。现有工作多集中于机器学习、信号处理等领域,极少有工作将 Nesterov 加速直接用于分布式经济调度问题。而针对微电网经济调度问题, Zeng 等<sup>[38]</sup>将 Nesterov 加速技术与分布式原始对偶算法结合,设计出一种新型分布式 Nesterov 优化算法。然而,该文献并没有将发电机组局部出力约束考虑进来。为解决该问题, Zhao 等<sup>[39]</sup>利用映射算子和微分反馈技术,设计一种分布式 Nesterov 加速算法。然而,该算法在稳定处会发生抖颤。

受上述讨论启发,本文拟利用 Nesterov 加速技术和自适应对偶变量设计一种新型分布式加速经济调度算法。主要创新和贡献可总结如下(如表格 1 所示):

- 相比于文献 [38], 本文将节点局部约束考虑进来, 所研究问题更具普遍性。文献 [39] 利用投影算子处理节点局部约束。然而, 该算法要求节点初始状态必须满足此约束。为消除此限制, 本文采用自适应对偶变量技术解决节点局部约束。因此, 本文所设计算法对发电机组初始值无约束。

- 文献 [39] 通过引入估计变量构造 Nesterov 加速算法。需要指出的是, 该框架利用对偶变量估计值驱动发电机组出力值, 这也导致该算法在稳定点附近容易产生振荡, 从而导致节点输出存在一定抖振现象。相比之下, 本文采用基于 Nesterov 加速机制的标准二阶阻尼动力学系统, 其加速项直接嵌入原始-对偶框架, 无需额外估计器辅助, 因此, 本文所提算法在保持 $O(\frac{1}{t^2})$ 收敛的同时能够抑制稳态抖振。

本文余下内容安排如下, 第 1 节对微电网经济调度问题进行描述, 第 2 节给出分布式 Nesterov 加速算法及其收敛性分析, 第 3 节提供两组案例仿真,

第 4 节对全文进行总结和展望。

**符号说明:**  $\mathbb{R}^n$  表示  $n$  维实数空间。对于向量  $x, y \in \mathbb{R}^n$ , 记位乘运算符为  $x \circ y = [x_1y_1, x_2y_2, \dots, x_ny_n]^T \in \mathbb{R}^n$ 。对于集合  $\Omega$ , 其内点集记为  $\text{int}(\Omega)$ , 边界点集记为  $\partial(\Omega)$ 。记投影算子为  $P_\Omega(x) = \arg \min_{y \in \Omega} \|x - y\|$ , 则有性质  $(P_\Omega(x) - x)^T (P_\Omega(x) - y) \leq 0, \forall y \in \Omega$ 。凸集合  $\Omega$  在点  $x$  的法锥定义为  $N_\Omega(x) = \{y : y^T(z - x) \leq 0, \forall z \in \Omega\}$ 。此外, 令  $n_\Omega(x) = \{y : \|y\| = 1, y^T(z - x) \leq 0, \forall z \in \Omega\}$ 。函数  $f(x)$  的梯度或次梯度定义为  $\nabla f(x)$ 。exp( $\cdot$ ) 为自然指数函数。

## 1 问题描述

本节首先给出微电网分布式经济调度问题的数学模型, 其次给出微电网系统的分布式通信拓扑。

微电网是由区域内各类分布式电源、储能装置、负荷以及监控保护装置构成的自治型发电系统。在微电网的运行中, 分布式经济调度是实现其经济高效运行的核心功能。其目标是在满足内部功率平衡与各发电单元运行约束的前提下, 最小化系统总运行成本。该问题包含以下核心元素:

**发电单元:** 微电网中包含  $n$  个分布式发电单元(如柴油发电机、微型燃气轮机、燃料电池、太阳能、风力发电等), 其集合记为  $\mathcal{V} = \{1, 2, \dots, n\}$ 。每个发电单元被视为一个具有独立计算和通信能力的智能体。

**成本函数:** 第  $i$  个发电源的成本  $f_i(x_i)$ , 表征其输出功率为  $x_i$  时所对应的运行成本。通常,  $f_i(x_i)$  是其出力  $x_i$  的凸函数<sup>[23]</sup>。

**局部运行约束:** 每个发电单元的有功出力受其物理极限限制, 即  $x_i \in \Omega_i = [x_i^{\min}, x_i^{\max}]$ , 其中  $x_i^{\min}$  和  $x_i^{\max}$  分别为其出力下限和上限。

**全局供需平衡约束:** 微电网的总发电出力必须与总负荷需求平衡, 即  $\sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n d_i$ , 其中  $d_i$  为各发电源的局部期望输出。上述全局供需平衡约束是分布式优化中需要协同解决的核心问题。

综合以上各元素, 本文研究的微电网分布式经济调度问题可表述为如下优化问题:

$$\begin{aligned} \min f(x) &= \sum_{i=1}^n f_i(x_i) \\ \text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^n x_i &= \sum_{i=1}^n d_i, \quad g_i(x_i) \leq 0, \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $f(x)$  是系统全局成本函数,  $g_i(x_i) = [x_i - x_i^{\max}, -x_i + x_i^{\min}]^T$ 。

为实现上述问题求解, 本文将引入以下与通信拓扑相关的代数图论知识. 微电网系统各发电单元间的通信行为可用图  $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{E}, \mathcal{A})$  表示, 其中  $\mathcal{E}$  表示所有发电单元组成的通信边集合,  $\mathcal{A} := [a_{ij}] \in \mathbb{R}^{n \times n}$  表示发电单元的伴随矩阵. 若发电单元  $i$  能够接收  $j$  传来的消息, 则有  $a_{ij} = 1, (i, j) \in \mathcal{E}$ . 此外, 图  $\mathcal{G}$  的拉普拉斯矩阵  $L := [l_{ij}] \in \mathbb{R}^{n \times n}$  定义为  $l_{ij} = -a_{ij}, \forall i \neq j$  和  $l_{ii} = \sum_{j=1}^n a_{ij}$ . 本文假设微电网通信拓扑具有无向性, 此时有  $a_{ij} = a_{ji}$  和  $L = L^T$ .

为后续算法设计和分析方便, 我们给出以下假设和引理.

**假设 1** 可微成本函数  $f_i(x_i), \forall i \in \mathcal{V}$  为凸函数.

**假设 2** 图  $\mathcal{G}$  为无向连通图.

**引理 1** 若假设 1 成立, 则存在常数  $\lambda_0$  和非负向量  $c_i^0 \in \mathbb{R}^2, \forall i \in \mathcal{V}$ , 使得问题 (1) 最优解  $x^* = [x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*]^T$  满足如下 KKT (Karush-Kuhn-Tucker) 条件<sup>[24]</sup>:

$$\begin{aligned} 0 &\in \nabla f_i(x_i^*) - \lambda_0 + \nabla g_i(x_i^*)^T c_i^0, \\ \sum_{i=1}^n x_i^* &= \sum_{i=1}^n d_i, \\ c_i^0 &\geq 0, c_i^0 \circ g_i(x_i^*) = 0, \end{aligned} \quad (2)$$

式中:  $\lambda_0$  为耦合约束  $\sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n d_i$  的对偶变量,  $c_i^0$  为局部约束  $g_i(x_i) \leq 0$  的对偶变量.

## 2 主要结果

本节首先基于一致性技术和 Nesterov 加速技巧设计分布式经济调度算法, 其次利用 Lyapunov 稳定性理论分析算法的收敛速率.

### 2.1 算法设计

由引理 1 可知, 求解问题 (1) 的关键在于如何获取耦合约束  $\sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n d_i$  的最优对偶变量  $\lambda_0$ . 为此, 本文拟针对各发电单元设置局部对偶变量  $\lambda_i$ , 并结合多智能体系统一致性技术实现其全局收敛至  $\lambda_0$ . 此外, 为提高算法收敛速率, 本文拟将 Nesterov 加速技术引入进来. 具体地, 分布式 Nesterov 加速经济调度算法设计如下:

$$\begin{aligned} \ddot{x}_i &= -\frac{\alpha_i}{t} \dot{x}_i - \nabla g_i^T(x_i + \frac{t}{2} \dot{x}_i) c_i^+ - (\nabla f_i(x_i) - \\ &\lambda_i - \frac{t}{2} \dot{\lambda}_i), \end{aligned} \quad (3a)$$

$$\begin{aligned} \ddot{\lambda}_i &= -\frac{\alpha_i}{t} \dot{\lambda}_i + d_i - x_i - \frac{t}{2} \dot{x}_i \\ &- \sum_{j=1}^n a_{ij} (\lambda_i + z_i + \frac{t}{2} \dot{z}_i - \lambda_j - z_j - \frac{t}{2} \dot{z}_j), \end{aligned} \quad (3b)$$

$$\ddot{z}_i = -\frac{\alpha_i}{t} \dot{z}_i + \sum_{j=1}^n a_{ij} (\lambda_i + \frac{t}{2} \dot{\lambda}_i - \lambda_j - \frac{t}{2} \dot{\lambda}_j), \quad (3c)$$

$$\dot{c}_i = t(-c_i + c_i^+), \quad (3d)$$

式中:  $\alpha_i \geq 3$  为控制参数,  $c_i^+ = \max(0, c_i + g_i(x_i + \frac{t}{2} \dot{x}_i))$ ,  $\nabla g_i(x_i + \frac{t}{2} \dot{x}_i) = [1, -1]^T$ . 算法 (3) 分为两部分. 1) 原始变量更新子系统 (3a). Nesterov 加速项  $\frac{\alpha_i}{t} \dot{x}_i$  构成一个随时间衰减的阻尼项, 赋予系统“冲量+惯性”特性, 这是 Nesterov 加速框架的核心. 自适应投影算子  $-\nabla g_i(x_i + \frac{t}{2} \dot{x}_i) c_i^+$  旨在将发电单元输出功率  $x_i$  限制在局部约束  $x_i \in \Omega_i$ . 梯度校正项  $\nabla f_i(x_i) - \lambda_i - \frac{t}{2} \dot{\lambda}_i$  旨在实现  $x_i$  沿成本函数最速下降方向更新, 确保  $x_i$  收敛至最优解  $x_i^*$ . 2) 对偶变量更新子系统 (3b)-(3d). 辅助变量  $z_i$  旨在确保耦合约束  $\sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n d_i$  成立. 基于梯度下降策略,  $\lambda_i$  协同收敛至最优对偶变量  $\lambda_0$ . 对偶变量  $c_i$  旨在确保  $g_i(x_i) \leq 0$  成立. 当约束不活跃时,  $-c_i + c_i^+$  促使  $c_i$  趋于零; 当约束活跃时,  $-c_i + c_i^+$  逼迫  $c_i$  增大至非零. 此外, 从式 (3d) 可得  $\dot{c}_i \geq -tc_i$ , 此时有  $c_i(t) \geq \exp(-\frac{t}{2}) c_i(0) \geq 0$ . 对于算法 (3), 其初始值设置为  $\forall i \in \mathcal{V}, x_i \in \mathbb{R}, \lambda_i(0) \in \mathbb{R}, z_i(0) \in \mathbb{R}, c_i(0) \geq 0$ .

令  $x, \lambda, z, c$  分别表示变量  $x_i, \lambda_i, z_i, c_i$  的聚合向量, 则算法 (3) 的紧凑形式可表示如下:

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= -\frac{1}{t} D \dot{x} - \nabla g^T(x + \frac{t}{2} \dot{x}) c^+ - \nabla f(x) + \lambda + \frac{t}{2} \dot{\lambda}, \\ \ddot{\lambda} &= -\frac{1}{t} D \dot{\lambda} + d - x - \frac{t}{2} \dot{x} - L \lambda - L(z + \frac{t}{2} \dot{z}), \\ \ddot{z} &= -\frac{1}{t} D \dot{z} + L(\lambda + \frac{t}{2} \dot{\lambda}), \\ \dot{c} &= t(-c + c^+), \end{aligned} \quad (4)$$

式中:  $D = \text{diag}\{\alpha_1, \dots, \alpha_n\} \in \mathbb{R}^n$ .

**注 1** 与文献 [38] 相比, 本文将节点局部约束  $x_i \in \Omega_i$  考虑进来, 使得所研究问题更具普适性. 令  $c_i = 0$ , 算法 (3) 退化为无局部约束经济调度算法. 针对节点凸约束集, 文献 [39] 利用映射算子  $P_{\Omega_i}(x_i) = \arg \min_{y \in \Omega_i} \|x_i - y\|$  实现算法设计. 因此, 文献 [39] 所提算法要求节点初始值满足  $x_i(0) \in \Omega_i$ . 与此相比, 本文采用自适应对偶更新机制 (式 (3d)) 间接处理局部约束: 通过对偶变量  $c_i$  的连续时间动力学自适应调整, 无需初始可行解将  $x_i$  趋向可行域. 故本文所设计算法无初始值约束, 更具普适性. 此外, 通过后续案例 1 仿真对比可以发现, 文献 [39] 所设计算法在稳定处发生抖振现象, 这是由于该算法采用对偶算子估计值代替对偶算子驱动  $\dot{x}_i$  更新. 而随着时

间趋于无穷,时变增益 $\frac{\beta}{t}$  ( $\beta > 0$ )趋于零,导致估算值偏离最优值。

**注 2** 在假设 1 中,我们默认成本函数 $f_i(x_i)$ 可微,因此算法 (3) 中直接使用梯度信息 $\nabla f_i(x_i)$ 驱动决策变量 $x_i$ . 针对不可微函数,方法一是将算法 (3) 中的梯度项 $\nabla f_i(x_i)$ 替换为次梯度 $\partial f_i(x_i)$ ,后续案例 1 采用此方法<sup>[23]</sup>. 结合次梯度定义 $\partial f_i(x_i) = \{g|f_i(y) \geq f_i(x_i) + g(y - x_i), \forall y \in \mathbb{R}\}$ 可知,其缺陷为次梯度元素不满足唯一性. 方法二,可借助近邻算子 $\text{Prox}_{f_i^1}(\cdot)$ 来处理成本函数中的不可微项,其中 $f_i^1$ 为成本函数 $f_i(x_i)$ 中的不可微部分<sup>[17]</sup>. 然而,近邻算子的引入导致算法设计及其收敛性分析变得困难. 未来,拟结合近邻算子求解非光滑资源分配问题。

## 2.2 收敛性分析

在给出算法的收敛性分析之前,首先给出如下引理。

**引理 2** 若假设 1 和 2 成立,令 $\chi^* = (x^*, \lambda^*, z^*, c^*)$ 是系统 (3) 的平衡点,则 $x^*$ 为问题 (1) 的最优解。

**引理 3** 若 $\chi^*$ 是系统 (3) 的平衡点,则 $(x^*, \lambda^*, z^*, c^*)$ 是问题 (1) 的 KKT 点。

**证明** 令 $\chi^*$ 为系统 (3) 的平衡点,可得

$$0 = -\nabla g^T(x^*)(c^+)^* - \nabla f(x^*) + \lambda^*, \quad (5a)$$

$$0 = d - x^* - L\lambda^* - Lz^*, \quad (5b)$$

$$0 = L\lambda^*, \quad (5c)$$

$$0 = -c + (c^+)^*, \quad (5d)$$

式中:  $(c^+)^* = \max(g(x^*) + c^*, 0)$ . 首先对于式 (5d), 可得结论 $g_i(x_i^*) \leq 0, \forall i \in \mathcal{V}$ . 接下来按以下两种情况讨论: 1)  $g_i(x_i^*) = 0$ , 结合结论 $c_i(t) \geq 0$ , 则此时有 $(c_i^+)^* = \max(0 + c_i^*, 0) = c_i^* \geq 0$ 和 $c_i^* \circ g_i(x_i^*) = 0$ . 2)  $g_i(x_i^*) < 0$ , 结合结论 $c_i(t) \geq 0$ , 则此时有 $(c_i^+)^* = \max(g_i(x_i^*) + c_i^*, 0) = c_i^*$ , 即 $c_i^* = 0$ . 同样可得结论 $c_i^* \circ g_i(x_i^*) = 0$ . 综合可知,  $c_i^* \circ g_i(x_i^*) = 0, c_i^* \geq 0, g_i(x_i^*) \leq 0$ . 结合拉普拉斯矩阵 $L$ 定义, 由式 (5c) 可知 $\lambda^* = \lambda_0 \otimes 1_n$ . 令 $1_n^T$ 左乘式 (5b), 结合性质 $1_n^T L = 0$ 可得 $\sum_{i=1}^n x_i^* = \sum_{i=1}^n d_i$ . 最终, 结合公式 (5a), 由引理 1 可知 $x^*$ 为问题 (1) 的最优解.  $\square$

令问题 (1) 的拉格朗日函数为 $\mathcal{L}(x, \lambda, z) = f(x) + \lambda^T(d - x - Lz) - \frac{1}{2}\lambda^T L\lambda$ , 接下来我们利用 Lyapunov 稳定性理论给出算法 (3) 的收敛速率。

**定理 1** 若假设 1 和 2 成立, 且控制参数 $\alpha_i$ 满足约束 $\alpha_i \geq 3, \forall i \in \mathcal{V}$ . 则所设计算法 (3) 收敛至问

题 (1) 的全局最优解, 且满足如下收敛速率:  $\mathcal{L}(x(t), z^*, \lambda^*) - \mathcal{L}(x^*, z^*, \lambda(t)) = O(\frac{1}{t^2}), \lambda^T L\lambda = O(\frac{1}{t^2}), \liminf \|\dot{x}\| = O(\frac{1}{t}), \liminf \|\dot{\lambda}\| = O(\frac{1}{t}), \liminf \|\dot{z}\| = O(\frac{1}{t})$ .

**证明** 收敛性分析详见附录 A.  $\square$

## 3 案例仿真

本节提供两个数值案例仿真用以验证所设计算法的有效性。

### 3.1 案例 1

考虑一个含有四发电机组的微电网系统, 每个发电机组的成本函数定义为 $f_i(x_i) = a_{i1}|x_i - a_{i3}| + a_{i2}x_i^2$ . 该微电网系统的参数如表 1 所示. 则案例 1 的理论最优解为 $x^* = [26.42, 35, 50, 33.58]$ . 令算法 (3) 初始状态为 $x(0) = [30, 30, 30, 30]^T$ , 其余变量初始值为零, 控制参数设置为 $\alpha_i = 3, \forall i \in \mathcal{V}$ , 满足定理 1 约束. 我们将算法 (3) 的运行轨迹图绘制在图 1 和图 2 中. 从图 1 可以看出, 本文所设计算法 (3) 能够收敛至理论最优解, 且此时最优对偶变量 $\lambda_0 = -102.7$ . 此外, 从最优解可知发电机组 2 和 3 的输出功率达到其约束上限. 这一点在图 2 中得到佐证. 从图 2 可知 $c_2^* > 0, c_3^* > 0$ , 则必有 $g_2(x_2^*) = 0, g_3(x_3^*) = 0$ . 从而可知, 本文所设计算法能够有效解决一般凸成本函数下的微电网经济调度问题. 针对每个节点 $i$ , 其邻居节点集记为 $N_i$ . 则在每个时刻 $t$ , 节点 $i$ 的计算开销约为 $5|N_i| + 11$ 次浮点运算, 通信开销为 $2|N_i|$ 次. 接下来我们分析验证控制参数 $\alpha_i$ 对算法收敛性的影响. 令误差为 $e(t) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2}(x_i(t) - x_i^*)^2$ , 则算法 (3) 在不同控制参数 $\alpha_i$ 下的误差收敛轨迹如图 3 所示. 从图中可以看出, 随着控制参数 $\alpha_i$ 的增大, 算法 (3) 收敛速率越慢. 此外, 通过仿真可以发现, 定理 1 中约束条件 $\alpha_i \geq 3$ 非常保守, 不满足此约束的控制参数依然能够确保算法收敛. 且随着控制参数 $\alpha_i$ 递减, 算法 (3) 收敛速率越快. 与此同时, 算法随着控制参数 $\alpha_i$ 递减, 震荡幅度越来越大. 该结论与 Nesterov 加速机制一致, 参数 $\alpha_i$ 作为阻尼项 $-\frac{\alpha_i}{t}\dot{x}_i$ 的系数, 其作用类似于 Nesterov 加速中的动量衰减系数. 较大的 $\alpha_i$ 会增强

表 1 与已有文献对比

文献	局部约束	初始约束	收敛性
[38]	否	初始自由	平滑
[39]	投影算子	$x_i(0) \in \Omega_i$	振荡
算法(3)	对偶自适应更新	初始自由	平滑

阻尼效应,抑制系统振荡,但也会减缓收敛速率;较小的 $\alpha_i$ 则减弱阻尼,能够提高收敛率但易引起超调与振荡.

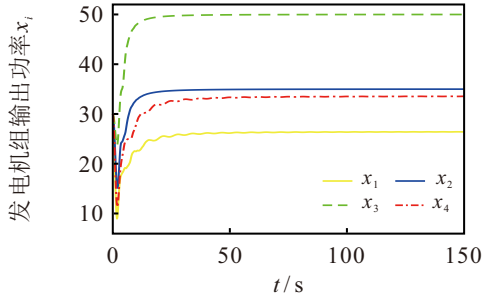


图1 案例1中发电机组输出功率 $x(t)$ 的轨迹图

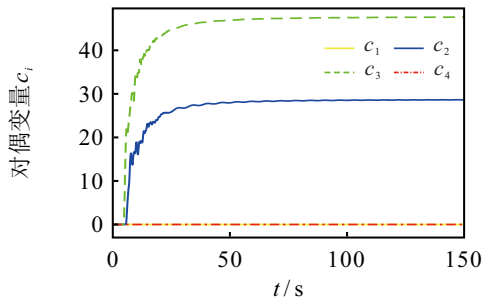


图2 案例1中对偶变量 $c(t)$ 的轨迹图

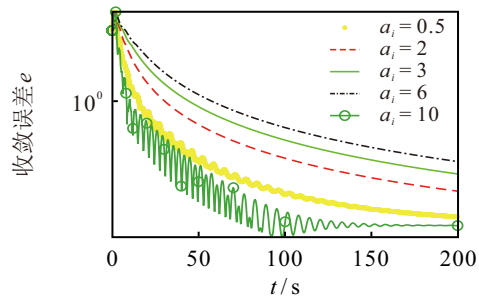


图3 案例1中不同控制参数 $\alpha_i$ 下的误差 $e(t)$ 轨迹图

表2 案例1微电网系统参数

发电机组编号	$a_{i1}$	$a_{i2}$	$a_{i3}$	$\Omega_i$	$d_i$
1	3	2	35	[20, 40]	45
2	4	1	0	[25, 35]	40
3	5	0.5	0	[35, 50]	25
4	2	1.5	0	[25, 45]	35

为验证本文所设计算法(记为算法I)的优越性,我们与现有分布式Nesterov经济调度算法<sup>[39]</sup>(记为算法II)进行对比.算法II具体迭代公式如下:

$$\dot{x}_i = \frac{\beta}{t}(P_{\Omega_i}(y_i) - x_i), \quad (6a)$$

$$\dot{y}_i = -\frac{t}{\beta}(\nabla f_i(x_i) + \omega_i + y_i - P_{\Omega_i}(y_i)), \quad (6b)$$

$$\dot{\lambda}_i = \frac{\beta}{t}(\omega_i - \lambda_i), \quad (6c)$$

$$\dot{\omega}_i = \frac{t}{\beta}(x_i - d_i + \sum_{j=1}^n a_{ij}(v_i - v_j - \lambda_i + \lambda_j)), \quad (6d)$$

$$\dot{z}_i = \frac{\beta}{t}(v_i - z_i), \quad (6e)$$

$$\dot{v}_i = -\frac{t}{\beta} \sum_{j=1}^n a_{ij}(\omega_i - \omega_j), \quad (6f)$$

式中: $\beta > 0$ 为控制参数.此外,系统的成本函数定义如下:

$$\begin{aligned} f_1(x_1) &= 0.05x_1^2 + 20x_1 + 50, \\ f_2(x_2) &= 5\exp(0.03x_2) + 15x_2, \\ f_3(x_3) &= 0.001x_3^3 + 0.04x_3^2 + 15x_3 + 500, \\ f_4(x_4) &= 15x_4. \end{aligned} \quad (7)$$

每个智能体的出力约束设置为 $x^{\min} = [20, 10, 30, 10]^T$ ,  $x^{\max} = [80, 50, 70, 60]^T$ , 局部期望负荷设置为 $d = [60, 40, 50, 45]^T$ .上述两个算法的误差收敛轨迹如图4所示,其中算法II与算法I采用相同控制参数,即 $\beta = 3$ .从图4可以看出算法II由于对偶变量 $\omega$ 在算法迭代时使用其估计值 $\lambda$ 作为反馈项,且迭代公式 $\dot{\lambda} = \frac{\beta}{t}(\omega - \lambda)$ 由于控制增益 $\frac{\beta}{t}$ 随着时间 $t$ 增涨逐渐稳定,不再受 $\omega$ 影响.从而导致算法II会在稳定点附近来回震荡.这一点在图5中得到印证.本文定义动态震荡指数DOI(dynamic oscillation index)为 $DOI = \frac{1}{T} \int_0^T |\ddot{x}| dt$ ,其中 $T$ 为算法仿真时间.该指数反映了算法在整个收敛过程中决策变量的加速度变化剧烈程度,值越小表明轨迹越平滑、抖振越小.算法I和算法II的动态震荡指数分别为 $DOI_I = 0.18$ 和

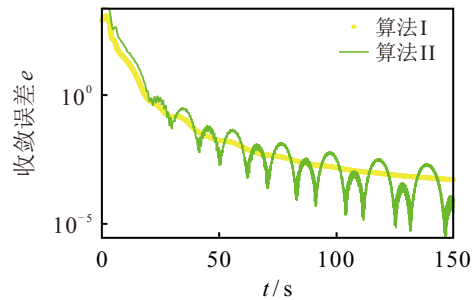


图4 案例1中不同算法收敛轨迹对比图

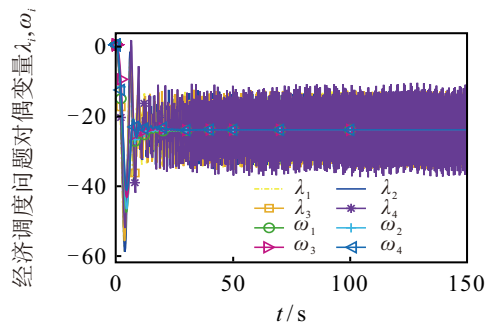


图5 案例1中算法II中对偶变量 $\lambda(t)$ 轨迹图

$DOI_{II} = 26.20$ . 结果表明, 算法 I 的 DOI 值平均约算法 II 的 0.7%, 说明算法 I 在动态收敛过程中的振荡幅度显著降低, 收敛轨迹更为平滑. 从而可以验证本文所设计算法能够更好抑制算法振荡.

接下来验证初始状态自由以及动态负荷侧需求下的算法有效性. 在  $t = 80$  s 时, 负荷需求调整为  $d_2 = 50$ , 发电机组 2 的成本参数调整为  $a_{32} = 0.2$ . 则算法 (3) 的运行轨迹如图 6 所示. 从图 6 可以发现, 算法 (3) 负荷需求发生改变后依然可以收敛至新的最优解. 但同时也可发现, 节点 3 的最优解没有发生变化, 但邻居节点信息的变化依然会导致节点 3 的输出功率变化, 直至收敛至最优解.

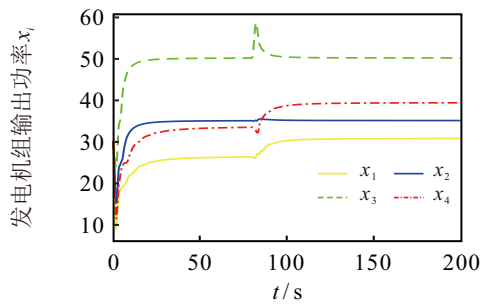


图6 案例 1 中动态负荷下发电机组输出功率  $x(t)$  的轨迹图

### 3.2 案例 2

为进一步验证所提算法在大规模系统中的有效性, 本节构造一个包含 20 个分布式发电单元的微电网经济调度问题, 对算法 (3) 进行仿真验证. 每个发电机组的成本函数形式与案例 1 相同, 可用于描述光伏、燃气轮机等分布式电源的简化经济成本. 案例 2 参数选取方式为  $a_{i1} = 3 + rand$ ,  $a_{i2} = 0.02 + 0.05rand$ ,  $a_{i3} = 25 + 2rand$ ,  $x_i^{\min} = 10$ ,  $x_i^{\max} = 50 + 5rand$ ,  $d_i = 25 + 5rand$ . 案例 2 所采用的通信网络为一个包含 20 个节点的无向连通图, 其基础结构为 20 节点环形网络, 在此基础上增加跳跃边 (1, 10), (5, 15), (7, 13), (3, 18), (12, 16), 以增强图的代数连通度. 案例 2 的仿真结果绘制在图 7 中. 从仿真结果可观察到, 所有发电机组的出力轨迹最终趋于某一稳态值, 并且满足引理 1KKT 条件, 即

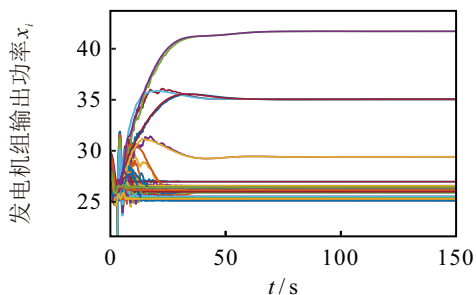


图7 案例 2 中发电机组输出功率  $x(t)$  的轨迹图

$x(t)$  收敛至全局最优解  $x^*$ . 该行为验证了原始子系统 (3a) 在时变阻尼项  $\frac{\alpha}{t}$  与加速项  $\frac{t}{2}\dot{x}$  的作用下能够保持全局渐近稳定性. 案例 2 的仿真结果从数值层面验证了定理 1 所给出的  $O(\frac{1}{t^2})$  收敛结论, 即本文所提算法在大规模节点下仍可保持快速光滑的收敛性能.

## 4 结论

本文针对微电网分布式经济调度中现有算法收敛速度较慢的问题, 将 Nesterov 加速思想引入连续时间原始—对偶优化框架, 设计了一种新型分布式 Nesterov 加速经济调度算法. 定理 1 已证明所提算法在一般凸成本函数可实现  $O(\frac{1}{t^2})$  的收敛速率. 案例表明, 所提算法在收敛平滑性方面具有明显优势, 能够有效避免稳定点附近的抖振. 未来工作将从以下两方面展开: 一是分析并改进算法在通信时延等非理想条件下的鲁棒性; 二是将算法推广至包含多能耦合约束的微电网综合能源系统, 以提升其工程适用性.

### 参考文献 (References)

- [1] 徐志凡, 李媛, 郑新宇, 等. 基于 IMPA 的含氢综合能源系统经济优化调度[J]. 控制与决策, 2025, 40(11): 3437-3444.  
(Xu Z F, Li Y, Zheng X Y, et al. Economic optimization dispatch of integrated energy system containing hydrogen based on IMPA[J]. Control and Decision, 2025, 40(11): 3437-3444.)
- [2] 纪良浩, 翟盼盼, 李华青. 基于事件触发机制的分布式经济调度加速优化算法[J]. 控制与决策, 2025, 40(4): 1217-1227.  
(Ji L H, Zhai P P, Li H Q. Distributed event-triggered accelerated optimization algorithm for solving smart grid economic dispatch problem on directed unbalanced communication topology[J]. Control and Decision, 2025, 40(4): 1217-1227.)
- [3] 刘骁康, 王致恒, 邢兰涛, 等. 面向构网-馈网混合转换器的直流微电网分布式均流调压控制[J]. 中国科学: 信息科学, 2025, 55(10): 2622-2636.  
(Liu X K, Wang Z H, Xing L T, et al. Distributed current sharing and voltage regulation control for DC microgrids with grid-forming and grid-feeding converters[J]. Science in China: Information Sciences, 2025, 55(10): 2622-2636.)
- [4] 李志勇, 谈世磊. 基于周期事件触发机制的分布式资源分配算法[J]. 控制与决策, 2025, 40(2): 563-571.  
(Li Z Y, Tan S L. Periodic event-triggered mechanism based distributed resource allocation algorithm[J]. Control and Decision, 2025, 40(2): 563-571.)
- [5] 耿超, 武永宝, 孙佳, 等. 抗干扰的多智能体系统固定时间分布式优化算法[J]. 控制与决策, 2024, 39(2):

- 527-535.  
(Geng C, Wu Y B, Sun J, et al. Fixed-time distributed optimization algorithm for multi-agent systems with disturbance resistance[J]. *Control and Decision*, 2024, 39(2): 527-535.)
- [6] Yang L X, Li X F, Sun M W, et al. Hybrid policy-based reinforcement learning of adaptive energy management for the energy transmission-constrained island group[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2023, 19(11): 10751-10762.
- [7] 宋逸哲, 刘妹琴, 董山玲, 等. 弱通信条件下多水下自主航行器分布式编队轨迹规划[J]. *控制与决策*, 2025, 40(1): 71-79.  
(Song Y Z, Liu M Q, Dong S L, et al. Distributed formation trajectory planning method for multiple autonomous underwater vehicles with limited communication[J]. *Control and Decision*, 2025, 40(1): 71-79.)
- [8] 徐磊, 时侠圣. 一种初始值自由的固定时间分布式最优一致性算法[J]. *控制与决策*, 2025, 40(4): 1377-1385.  
(Xu L, Shi X S. An initialization-free distributed fixed-time algorithm for optimal consensus[J]. *Control and Decision*, 2025, 40(4): 1377-1385.)
- [9] 胡嘉诚, 张宁, 曹雨桐, 等. 分布式能源接入下虚拟电厂负荷优化调度决策[J]. *综合智慧能源*, 2025, 47(1): 62-69.  
(Hu J C, Zhang N, Cao Y T, et al. Load optimization scheduling decision for virtual power plants with distributed energy accessed[J]. *Integrated Intelligent Energy*, 2025, 47(1): 62-69.)
- [10] 杨飞生, 刘佳明, 丁瑞森, 等. 基于半同态加密体制的安全分布式经济调度[J]. *控制理论与应用*, 2025, 42(9): 1711-1720.  
(Yang F S, Liu J M, Ding R S, et al. Secure distributed economic dispatch based on semi-homomorphic encryption[J]. *Control Theory & Applications*, 2025, 42(9): 1711-1720.)
- [11] Nedic A, Ozdaglar A. Distributed subgradient methods for multi-agent optimization[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2009, 54(1): 48-61.
- [12] 姜霞, 曾宪琳, 孙健, 等. 多智能体系统分布式优化综述与前瞻[J]. *中国科学: 信息科学*, 2025, 55(12): 2965-2990.  
(Jiang X, Zeng X L, Sun J, et al. Survey and prospects of distributed optimization in multi-agent systems[J]. *Scientia Sinica: Informationis*, 2025, 55(12): 2965-2990.)
- [13] Yang S P, Tan S C, Xu J X. Consensus based approach for economic dispatch problem in a smart grid[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(4): 4416-4426.
- [14] 王颂, 汪隆君, 王钢, 等. 考虑非严格凸成本建模的电网分布式经济调度[J]. *南方电网技术*, 2025, 19(3): 130-140.  
(Wang S, Wang L J, Wang G, et al. Distributed economic dispatch of microgrid considering non-strictly convex cost modeling[J]. *Southern Power System Technology*, 2025, 19(3): 130-140.)
- [15] Lü Q G, Liao X F, Li H Q, et al. Achieving acceleration for distributed economic dispatch in smart grids over directed networks[J]. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, 2020, 7(3): 1988-1999.
- [16] Deng W, Liang S, Hong Y G. Distributed robust optimization with coupled constraints via Tseng's splitting method[J]. *Automatica*, 2023, 156: 111177.
- [17] Huang Y, Zeng X L, Sun J, et al. Distributed event-triggered algorithm for convex optimization with coupled constraints[J]. *Automatica*, 2024, 170: 111877.
- [18] 王轶楠, 时侠圣, 林志赟. 基于快速一致性的分布式经济调度算法[J]. *控制理论与应用*, 2025, 42(10): 2028-2037.  
(Wang Y N, Shi X S, Lin Z Y. A fast consensus-based distributed economic dispatch algorithm[J]. *Control Theory & Applications*, 2025, 42(10): 2028-2037.)
- [19] 郭志军, 曾令伟, 洪宝源, 等. 动态事件触发通信下分布式预定时间非光滑约束优化算法[J]. *控制与决策*, 2025, 40(6): 2031-2040.  
(Guo Z J, Zeng L W, Hong B Y, et al. Distributed non-smooth constrained optimization: A predefined-time and dynamic event-triggered approach[J]. *Control and Decision*, 2025, 40(6): 2031-2040.)
- [20] Zhang Y Q, Deng Z H, Hong Y G. Distributed optimal coordination for multiple heterogeneous Euler-Lagrangian systems[J]. *Automatica*, 2017, 79: 207-213.
- [21] Wen G H, Yu X H, Liu Z W. Recent progress on the study of distributed economic dispatch in smart grid: An overview[J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2021, 22(1): 25-39.
- [22] Yi P, Hong Y G, Liu F. Initialization-free distributed algorithms for optimal resource allocation with feasibility constraints and application to economic dispatch of power systems[J]. *Automatica*, 2016, 74: 259-269.
- [23] Deng Z H, Liang S, Hong Y G. Distributed continuous-time algorithms for resource allocation problems over weight-balanced digraphs[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2018, 48(11): 3116-3125.
- [24] Zhu Y N, Ren W, Yu W W, et al. Distributed resource allocation over directed graphs via continuous-time algorithms[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2021, 51(2): 1097-1106.
- [25] Jia W W, Liu N, Qin S T. An adaptive continuous-time algorithm for nonsmooth convex resource allocation optimization[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2022, 67(11): 6038-6044.
- [26] Li M M, Watson J, Lestas I. Distributed optimal secondary frequency control in power networks with delay independent stability[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2024, 69(6): 3748-3763.
- [27] Teng F, Ban Z X, Li T S, et al. A privacy-preserving distributed economic dispatch method for integrated port microgrid and computing power network[J]. *IEEE*

- [Transactions on Industrial Informatics](#), 2024, 20(8): 10103-10112.
- [28] Ji L H, Dou Y H, Zhang C J, et al. Self-triggered consensus-based strategy for economic dispatch in uncertain communication networks[J]. [IEEE Transactions on Network Science and Engineering](#), 2024, 11(6): 6652-6663.
- [29] Huang B N, Liu L N, Zhang H G, et al. Distributed optimal economic dispatch for microgrids considering communication delays[J]. [IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems](#), 2019, 49(8): 1634-1642.
- [30] Shi X S, Su Y X, Huang D R, et al. Distributed optimization algorithm for the economic dispatch problem over delayed communication network[J]. [IEEE Transactions on Signal and Information Processing Over Networks](#), 2025, 11: 1332-1343.
- [31] Dong Z W, Mao S, Perc M, et al. A distributed dynamic event-triggered algorithm with linear convergence rate for the economic dispatch problem[J]. [IEEE Transactions on Network Science and Engineering](#), 2023, 10(1): 500-513.
- [32] Chen W, Wang Z D, Ge Q B, et al. Quantized distributed economic dispatch for microgrids: Paillier encryption-decryption scheme[J]. [IEEE Transactions on Industrial Informatics](#), 2024, 20(4): 6552-6562.
- [33] Li X X, Xie L H, Hong Y G. Distributed continuous-time nonsmooth convex optimization with coupled inequality constraints[J]. [IEEE Transactions on Control of Network Systems](#), 2020, 7(1): 74-84.
- [34] Lin W T, Wang Y W, Li C J, et al. Distributed resource allocation *via* accelerated saddle point dynamics[J]. [IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica](#), 2021, 8(9): 1588-1599.
- [35] Liu J X, Chen S, Cai S Z, et al. Accelerated distributed aggregative optimization[J]. [IEEE Transactions on Automatic Control](#), 2025, 70(9): 5792-5807.
- [36] Lin Y F, Li W L, Zhang B, et al. An improved distributed nesterov gradient tracking algorithm for smooth convex optimization over directed networks[J]. [IEEE Transactions on Automatic Control](#), 2025, 70(4): 2738-2745.
- [37] Liu B, Du W L, Li Z M. Accelerated distributed nesterov optimization subject to complex constraints and its applications[J]. [IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems](#), 2024, 54(4): 2055-2066.
- [38] Zeng X L, Lei J L, Chen J. Dynamical primal-dual nesterov accelerated method and its application to network optimization[J]. [IEEE Transactions on Automatic Control](#), 2023, 68(3): 1760-1767.
- [39] Zhao Y, He X, Yu J Z, et al. Distributed accelerated primal-dual neurodynamic approaches for resource allocation problem[J]. [Science China Technological Sciences](#), 2023, 66(12): 3639-3650.

#### 作者简介

时侠圣 (1992-), 男, 副教授, 博士 (后), 从事分布式优化与博弈及其应用等研究, E-mail: [shixiasheng@zju.edu.cn](mailto:shixiasheng@zju.edu.cn);

吴炜 (1981-), 男, 副教授, 博士, 从事分布式参数系统边界控制、机器人嵌入式控制等相关的研究, E-mail: [weiwu@jiangnan.edu.cn](mailto:weiwu@jiangnan.edu.cn);

李中美 (1989-), 女, 副教授, 博士, 从事工业过程建模与优化控制、强化学习等相关的研究, E-mail: [lizhongmei@ecust.edu.cn](mailto:lizhongmei@ecust.edu.cn).