

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231420

# 孤岛微电网固定时间分布式鲁棒二次控制

曹晓, 李泽, 崔国增

(苏州科技大学电子与信息工程学院, 江苏 苏州 215009)

**摘要:** 针对孤岛微电网实际运行过程中出现的未知外部扰动, 提出了一种固定时间分布式鲁棒二次控制算法, 实现了电网频率一致性控制, 有效抑制了不确定干扰, 提高了系统的鲁棒性能。首先, 通过设计基于饱和函数的新型控制算法, 有效地解决了现有控制器高频切换引发的抖动问题。同时确保二次控制能够在固定时间内达到稳定状态, 且收敛时间上界不依赖于任何初始状态。然后, 在设计控制算法的基础上, 采用改进的分布式事件触发机制, 在满足收敛速度和达到电网频率一致性的基础上减轻了通信负担, 减少了控制器更新的频率, 显著降低了通信资源的消耗, 并排除了 Zeno 行为。最后, 利用 Matlab/Simulink 仿真平台验证了所提控制算法的有效性。

**关键词:** 孤岛微电网; 未知扰动; 固定时间一致性; 分布式事件触发机制; Zeno 行为

## Distributed robust fixed-time secondary control of islanded microgrids

CAO Xiao, LI Ze, CUI Guozeng

(School of Electronic and Information Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

**Abstract:** In response to the unknown external disturbances encountered during the operation of islanded microgrids, a fixed-time distributed robust secondary control algorithm is proposed to achieve grid frequency consensus control. This effectively suppresses uncertain disturbances, and enhances the robustness of the system. First, by designing a novel control algorithm based on saturation functions, the issue of oscillations caused by high-frequency switching in existing controllers is effectively resolved. Additionally, it ensures that the secondary control reaches a stable state within a fixed-time, with a convergence time upper bound independent of any initial states. Secondly, building upon the designed control algorithm, an improved distributed event-triggered mechanism is employed. This reduces the communication burden and minimizes the controller update frequency while satisfying the convergence speed requirement and achieving frequency consensus in the microgrid. This approach significantly decreases the consumption of communication resources and eliminates Zeno behavior. Finally, the effectiveness of the proposed control algorithm is validated using the Matlab/Simulink simulation platform.

This work is supported by the Excellent Youth Fund of Natural Science Foundation of Jiangsu Province (No. BK20211605).

**Key words:** islanded microgrids; unknown disturbances; fixed-time consensus; distributed event-triggered mechanism; Zeno behavior

## 0 引言

随着传统能源的逐渐减少和可再生能源的日益普及, 微电网在各个国家都受到了广泛的关注<sup>[1-2]</sup>。微电网是一种自主的电力系统, 由分布式电源 (distributed generator, DG)、负载、储能装置和控制

装置等组成, 可以为用户提供可靠的电力需求<sup>[3-4]</sup>。将微电网视为一个整体, 通过一个公共连接点 (point of common coupling, PCC) 与主电网连接。在主电网受到干扰期间, PCC 处于断开状态, 微电网从并网模式转变为孤岛模式, 独立给负载供电, 并控制电网稳定可靠运行<sup>[5-6]</sup>。在孤岛模式下运行, 系统的频率和电压存在着一定的偏差, 采用分层控制方案可以保证负载在发生小范围内变动时系统依旧保持稳定<sup>[7-8]</sup>。其中二次控制思想的引入是为了解决初级控制采用下垂控制策略导致电压和频率偏离其额定

**基金项目:** 江苏省自然科学基金优秀青年基金项目资助 (BK20211605); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目资助 (SJCX23-1721)

值问题<sup>[9-10]</sup>，为本文的主要研究对象。

多智能体一致性算法在微电网二次控制中的应用是近年来的研究热点<sup>[11-12]</sup>。该算法把每个 DG 视为一个智能体，通过各智能体之间的信息交换和协作，实现逆变器间电压和频率的一致性控制<sup>[13]</sup>。但是，在实际的微电网运行环境中，外部干扰是无法避免的，因此一致性算法需要根据实际情况进行改进，以获得良好的系统性能和稳定性。考虑微电网中的未知干扰问题，文献[14-15]采用基于扰动观测器的滑膜控制策略，有效抑制了扰动，实现电压和频率一致性调节，但扰动观测器的使用增加了控制系统的复杂程度，滑模控制方案的计算过程较为复杂。文献[16]提出了一种分布式鲁棒有限时间二次控制策略，并针对微电网系统存在未知扰动和模型不确定性的情况，采用鲁棒  $H_\infty$  控制方法，提高了系统的鲁棒性和灵活性，消除了微电网中的频率偏差。上述策略均可在有限时间内收敛，其精度高，收敛速度快，抗干扰能力强，鲁棒性强。

考虑到有限时间控制方法的收敛时间对于系统的初始条件具有依赖性<sup>[17]</sup>，Parsegov 等人<sup>[18]</sup>首次提出了固定时间控制的思想。文献[19-21]对存在未知外部扰动的微电网系统进行固定时间一致性研究，着重解决多智能体一致性控制算法的设计问题。文献[19]设计了一种基于固定时间反馈观测器的控制算法，其设计过程简易，不依赖微电网参数、拓扑结构、负载和传输线路阻抗，一致性控制容易实现。文献[20]提出了一种基于滑膜控制方案的固定时间分布式控制策略，在考虑交流微电网中未知扰动和不确定参数的情况下确保实现一致性。文献[21]针对孤岛微电网的非线性动态特性和不确定性干扰，提出了一种鲁棒的分布式固定时间二次电压和频率恢复控制方案，所提出的控制方案对有界不确定干扰具有较强的鲁棒性。

然而，上述一致性结果都需要持续的通信和控制更新，这会带来通信和计算资源的过度消耗。因此，基于事件触发的固定时间一致性控制方案获得了关注<sup>[22-25]</sup>。文献[26]针对未知的外部干扰设计了两新的分布式鲁棒二次控制算法，算法考虑分布式事件触发机制，保证了通信和控制更新仅在满足特定条件时才会执行，有效减少了通信资源浪费。但是由于 DG 只能被动接收邻居的触发信息，一旦其邻居 DG 过多，控制器的更新次数会随之增加。因此本文采用改进的分布式事件触发机制来解决邻居 DG 数量过多导致的资源浪费问题。

通过上述分析，本文提出一种固定时间分布式鲁棒二次控制算法，该算法能够在微电网存在外部

有界扰动的情况下实现频率恢复和有功功率按比例分配。本文主要贡献如下。

1) 针对微电网系统的未知外部扰动情况，本文设计了一种基于饱和函数的新型控制算法，具有较强的抗干扰性，确保微电网的鲁棒一致性稳定。同时，该算法有效解决了现有控制算法高频切换引发的抖动问题。

2) 通过引入改进的分布式事件触发机制，在抗干扰性能基础上，大幅降低了系统触发次数，减轻了通信负担，节省了通信成本。同时，验证了微电网系统在外外部干扰情况下，可以具有正的最小触发间隔，避免了 Zeno 行为。

3) 本文设计的固定时间一致性控制算法可以确保系统在固定时间内快速收敛，且该收敛时间不依赖微电网系统的初始状态。

## 1 预备知识

### 1.1 图论

本文中，考虑一个由  $N$  个智能体组成的无向图  $G=(\mathcal{G}, E, \mathbf{A})$ ，如图 1 所示，每个智能体视为一个节点，其中，顶点集  $\mathcal{G}=\{1, 2, \dots, N\}$ ，边集  $E$  定义为  $E=\mathcal{G} \times \mathcal{G}$ ，表示节点之间的通信连路，系统的邻接矩阵  $\mathbf{A}$  定义为  $\mathbf{A}=[a_{ij}]_{N \times N}$ ，其中， $a_{ij}$  为通信权重，若  $(\mathcal{G}_j, \mathcal{G}_i) \in E$ ，则  $a_{ij}=1$ ，否则， $a_{ij}=0$ 。度矩阵  $\mathbf{D}$  定义为  $\mathbf{D}=\text{diag}\{d_i\} \in \mathbf{R}^{N \times N}$ ，其中， $d_i$  为对角元素，定义为  $d_i=\sum_{j=1, j \neq i}^N a_{ij}$ 。 $G$  的拉普拉斯矩阵  $\mathbf{L}$  定义为  $\mathbf{L}=[l_{ij}]_{N \times N}$ ，满足  $\mathbf{L}=\mathbf{D}-\mathbf{A}$ ，其中，当  $i=j$  时， $l_{ij}=\sum_{j=1}^N a_{ij}$ ，否则， $l_{ij}=-a_{ij}$ 。牵制矩阵  $\mathbf{B}$  定义为  $\mathbf{B}=\text{diag}\{b_i\} \in \mathbf{R}^{N \times N}$ ，其中， $b_i$  为 DG  $i$  和虚拟领导者节点间的连接权重，若 DG  $i$  能够收到虚拟领导者节点提供的参考值，则  $b_i=1$ ，否则  $b_i=0$ 。

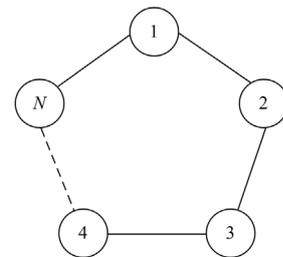


图 1 无向通信图

Fig. 1 The undirected communication graph

值得注意的是, 对于一个无向图, 当  $a_{ij} = a_{ji} = 1$  时, DG  $j$  和 DG  $i$  可以互相接收信息,  $j$  是  $i$  的邻居节点。若在图  $G$  中的任意两个节点存在一条路径, 则图  $G$  称为连通图。

### 1.2 孤岛微电网模型

图 2 为孤岛微电网系统中第  $i$  个 DG 基于电压源逆变器(voltage sourced converter, VSC)的控制结构图, 由 VSC、LC 滤波器、RL 输出连接器、功率计算模块、下垂控制器、电流控制器、电压控制器等模块组成<sup>[27]</sup>。

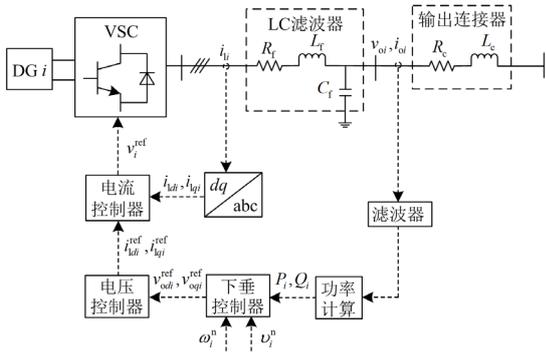


图 2 单个 DG 的控制结构图

Fig. 2 Control structure of a single DG

(1) 初级控制层: 下垂控制器广泛应用于孤岛微电网初级控制, 其利用分布式次级控制器提供的电压和频率参考值来调节输出电压。初级控制可通过  $P-\omega$  和  $Q-v$  下垂控制实现, 分别为

$$\omega_i(t) = \omega_i^n(t) - \kappa_i^p P_i(t) \quad (1)$$

$$v_i(t) = v_i^n(t) - \kappa_i^q Q_i(t) \quad (2)$$

式中:  $\omega_i(t)$  和  $v_i(t)$  分别是 DG  $i$  的频率和电压幅值;  $\omega_i^n(t)$  和  $v_i^n(t)$  分别是 DG  $i$  的频率和电压幅值的标称值, 由次级控制层提供;  $P_i(t)$  和  $Q_i(t)$  分别是 DG  $i$  的逆变器末端实际测量的有功功率和无功功率;  $\kappa_i^p$  和  $\kappa_i^q$  分别是 DG  $i$  的频率和电压幅值下垂系数, 设为

$$\kappa_i^p = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{P_i^{\max}}, \kappa_i^q = \frac{v_{\max} - v_{\min}}{Q_i^{\max}} \quad (3)$$

式中:  $\omega_{\max}$  和  $\omega_{\min}$  分别表示允许的最大、最小频率;  $v_{\max}$  和  $v_{\min}$  分别表示允许的最大、最小电压幅值;  $P_i^{\max}$  和  $Q_i^{\max}$  分别是 DG  $i$  的最大有功、无功功率。

(2) 次级控制层: 应用反馈线性化技术, 当输入扰动时, 第  $i$  个 DG 的频率和有功功率动态方程为

$$\dot{\omega}_i(t) = u_i^{\omega}(t) + \varpi_i^{\omega}(t) \quad (4)$$

$$\dot{P}_i(t) = u_i^p(t) + \varpi_i^p(t) \quad (5)$$

式中:  $u_i^{\omega}(t)$  和  $u_i^p(t)$  分别是 DG  $i$  的频率和有功功率的控制输入;  $\varpi_i^{\omega}(t)$  和  $\varpi_i^p(t)$  分别是 DG  $i$  的频率和有功功率控制的未知外部有界扰动输入。对式(1)求导可得式(6)。

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_i^n(t) &= \int (\dot{\omega}_i + \kappa_i^p \dot{P}_i) dt = \\ &\int (u_i^{\omega} + \varpi_i^{\omega}) dt + \kappa_i^p \int (u_i^p + \varpi_i^p) dt \end{aligned} \quad (6)$$

### 1.3 重要引理

引理 1<sup>[26]</sup>: 令  $x_1, x_2, \dots, x_N \geq 0$ , 则

$$\sum_{i=1}^N x_i^{\theta} \geq \left( \sum_{i=1}^N x_i \right)^{\theta}, 0 < \theta \leq 1 \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^N x_i^{\theta} \geq N^{1-\theta} \left( \sum_{i=1}^N x_i \right)^{\theta}, \theta > 1 \quad (8)$$

引理 2<sup>[27]</sup>: 半正定矩阵  $L$  是无向连通图  $G$  对应的拉普拉斯矩阵, 其第二小特征值  $\lambda_2 > 0$ 。若  $L_N^T x = 0$ , 则  $x^T L x \geq \lambda_2 x^T x$ 。若牵制矩阵  $B$  中的元素  $b_i > 0$ , 则  $L + B$  为正定矩阵, 其最小特征值  $\lambda_1 > 0$ , 满足  $x^T (L + B) x \geq \lambda_1 x^T x$ 。

引理 3<sup>[21]</sup>: 考虑如下的非线性系统

$$\dot{x}(t) = f(x(t)), f(x(0)) = 0, x(t) \in \mathbf{R}^N \quad (9)$$

其中,  $f(\cdot): \mathbf{R}^N \rightarrow \mathbf{R}^N$  是连续函数, 原点为该系统的平衡点。若 Lyapunov 函数  $V(x(t))$ , 其解满足如下不等式

$$\dot{V}(x(t)) \leq -(\alpha V^r(x(t)) + \beta V^s(x(t)))^k \quad (10)$$

其中,  $V(x(t)) \in \mathbf{R}^+$ , 参数  $\alpha, \beta, r, s, k > 0$ ,  $rk < 1$  以及  $sk > 1$ 。则该非线性系统是固定时间稳定的, 稳定时间为

$$T \leq \frac{1}{\alpha^k(1-rk)} + \frac{1}{\beta^k(sk-1)} \quad (11)$$

假设 1: 无向图  $G$  为连通图, 且至少存在一个 DG 单元能够接收到虚拟领导者节点提供的电压、频率参考值。

假设 2: 外部扰动是有界的, 即存在正常数  $\partial_{\omega}$  和  $\partial_p$ , 使  $\max \|\varpi_i^{\omega}(t)\|_{\infty} \leq \partial_{\omega}$  和  $\max \|\varpi_i^p(t)\|_{\infty} \leq \partial_p$ 。

## 2 基于事件触发的固定时间一致性算法

考虑微电网系统中存在的不确定干扰项  $\partial_{\omega}$ 、 $\partial_p$ , 本文提出了基于改进的分布式事件触发机制算法, 消除了不确定干扰项, 实现微电网系统在固定时间内频率恢复和有功功率按比例分配。

### 2.1 基于符号函数的控制算法 DETC-sign

算法 DETC-sign 设计为

$$\begin{aligned}
u_i^{\omega}(t) = & \\
& \alpha_{\omega} \left[ \sum_{j=1}^N a_{ij} (\omega_j(t_k^{\omega i}) - \omega_i(t_k^{\omega i})) + b_i (\omega_{\text{ref}} - \omega_i(t_k^{\omega i})) \right]^{\frac{m}{n}} + \\
& \beta_{\omega} \left[ \sum_{j=1}^N a_{ij} (\omega_j(t_k^{\omega i}) - \omega_i(t_k^{\omega i})) + b_i (\omega_{\text{ref}} - \omega_i(t_k^{\omega i})) \right]^{\frac{\nu}{\mu}} + \\
& \gamma_{\omega} \text{sign} \left[ \sum_{j=1}^N a_{ij} (\omega_j(t_k^{\omega i}) - \omega_i(t_k^{\omega i})) + b_i (\omega_{\text{ref}} - \omega_i(t_k^{\omega i})) \right]
\end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned}
u_i^p(t) = & \alpha_p \left[ \sum_{j=1}^N a_{ij} (\kappa_j^p P_j(t_k^{p i}) - \kappa_i^p P_i(t_k^{p i})) \right]^{\frac{m}{n}} + \\
& \beta_p \left[ \sum_{j=1}^N a_{ij} (\kappa_j^p P_j(t_k^{p i}) - \kappa_i^p P_i(t_k^{p i})) \right]^{\frac{\nu}{\mu}} + \\
& \gamma_p \text{sign} \left[ \sum_{j=1}^N a_{ij} (\kappa_j^p P_j(t_k^{p i}) - \kappa_i^p P_i(t_k^{p i})) \right]
\end{aligned} \quad (13)$$

式中:  $\alpha_{\omega}$ 、 $\beta_{\omega}$ 、 $\gamma_{\omega}$ 、 $\alpha_p$ 、 $\beta_p$ 、 $\gamma_p$  是控制增益, 均为正常数;  $m$ 、 $n$ 、 $\mu$ 、 $\nu$  是 4 个控制参数, 均为正奇数, 满足  $m > n$ ,  $\mu > \nu$ ;  $t_k^{\omega i}$  和  $t_k^{p i}$  分别表示 DG  $i$  的频率和有功功率的第  $k$  个事件触发时间。算法采用分布式事件触发机制, 控制器更新仅利用自身信息, 减轻了通信负担。

控制算法采用符号函数, 其高频切换在微电网系统运行过程中可能导致抖动现象。饱和函数的提出可以有效缓解抖动。同时, 引入饱和函数不会发生 Zeno 行为。

文献[26]的算法采用  $\sum_{j=1}^N a_{ij} (\kappa_j^p P_j(t_k^{p i}) - \kappa_i^p P_i(t_k^{p i}))$  的控制率, 其中  $t_k^{p i}$  表示在第  $k$  个事件触发之前邻居 DG  $j$  的最新触发时刻状态, 满足  $k' \triangleq \arg \min_{\rho \in N} \{t - t_{\rho}^j | t \geq t_{\rho}^j\}$ , 系统在 DG 单元及其邻居 DG 单元的事件触发时间更新; 而本文采用  $\sum_{j=1}^N a_{ij} (\kappa_j^p P_j(t_k^{p i}) - \kappa_i^p P_i(t_k^{p i}))$  的控制率, DG 单元仅在其自身触发时刻更新, 整个系统的触发次数会减少。

定义 DG  $i$  的频率测量误差为  $e_i^{\omega}(t) = \omega_i(t_k^{\omega i}) - \omega(t)$  和频率跟踪误差为  $\varepsilon_i^{\omega}(t) = \omega_i(t) - \omega_{\text{ref}}$ , 对跟踪误差求导, 可得

$$\begin{aligned}
\dot{\varepsilon}_i^{\omega}(t) = & \dot{\omega}_i(t) = u_i^{\omega}(t) + \varpi_i^{\omega}(t) = \varpi_i^{\omega}(t) + \\
& \alpha_{\omega} \left[ \sum_{j=1}^N a_{ij} (\varepsilon_j^{\omega}(t_k^{\omega i}) - \varepsilon_i^{\omega}(t_k^{\omega i})) - b_i (\varepsilon_i^{\omega}(t_k^{\omega i})) \right]^{\frac{m}{n}} + \\
& \beta_{\omega} \left[ \sum_{j=1}^N a_{ij} (\varepsilon_j^{\omega}(t_k^{\omega i}) - \varepsilon_i^{\omega}(t_k^{\omega i})) - b_i (\varepsilon_i^{\omega}(t_k^{\omega i})) \right]^{\frac{\nu}{\mu}} +
\end{aligned}$$

$$\gamma_{\omega} \text{sign} \left[ \sum_{j=1}^N a_{ij} (\varepsilon_j^{\omega}(t_k^{\omega i}) - \varepsilon_i^{\omega}(t_k^{\omega i})) - b_i (\varepsilon_i^{\omega}(t_k^{\omega i})) \right] \quad (14)$$

定义频率的中间变量  $\phi_{\omega}(t)$ 、 $\varphi_{\omega i}(t)$ 、 $\phi_{p i}(t)$  和  $\varphi_{p i}(t)$  表示为

$$\phi_{\omega i}(t) = \sum_{j=1}^N a_{ij} (\varepsilon_j^{\omega}(t_k^{\omega i}) - \varepsilon_i^{\omega}(t_k^{\omega i})) - b_i (\varepsilon_i^{\omega}(t_k^{\omega i})) \quad (15)$$

$$\varphi_{\omega i}(t) = \sum_{j=1}^N a_{ij} (\varepsilon_j^{\omega}(t_k^{\omega i}) - \varepsilon_i^{\omega}(t)) - b_i (\varepsilon_i^{\omega}(t)) \quad (16)$$

$$\phi_{p i}(t) = \sum_{j=1}^N a_{ij} (\kappa_j^p P_j(t_k^{p i}) - \kappa_i^p P_i(t_k^{p i})) \quad (17)$$

$$\varphi_{p i}(t) = \sum_{j=1}^N a_{ij} (\kappa_j^p P_j(t_k^{p i}) - \kappa_i^p P_i(t)) \quad (18)$$

DG  $i$  的事件触发函数构造为

$$g_i^{\omega}(t) = |e_i^{\omega}(t) - \sigma_1 \alpha_{\omega} |\varphi_{\omega i}(t)|^{\frac{m}{n}} - \sigma_1 \beta_{\omega} |\varphi_{\omega i}(t)|^{\frac{\nu}{\mu}} - \sigma_1 \gamma_{\omega}| \quad (19)$$

式中,  $\sigma_1$  是可以稍后选择的频率的触发参数,  $\sigma_1 \in (0, 1)$ 。

有功功率部分同频率, 其 DG  $i$  的事件触发函数构造为

$$g_i^p(t) = |e_i^p(t) - \sigma_2 \alpha_p |\varphi_{p i}(t)|^{\frac{m}{n}} - \sigma_2 \beta_p |\varphi_{p i}(t)|^{\frac{\nu}{\mu}} - \sigma_2 \gamma_p| \quad (20)$$

式中:  $\sigma_2$  是可以稍后选择的有功功率的触发参数,  $\sigma_2 \in (0, 1)$ ;  $e_i^p(t)$  是有功功率的测量误差。

定理 1: 对于 DG  $i$ , 只有在  $g_i^{\omega}(t) \geq 0$  或者  $g_i^p(t) \geq 0$  时触发控制器更新, 否则不触发。此外, 若假设 1 成立, 在分布式固定时间一致性控制算法式(12)和式(13)的作用下, 当式(4)、式(5)满足式(21)时, 所有 DGs 的频率恢复和有功功率按比例分配能够在固定时间内完成。

$$\begin{cases} \partial_{\omega} \leq (1 - \sigma_1) \gamma_{\omega} \\ \partial_p \leq (1 - \sigma_2) \gamma_p \end{cases} \quad (21)$$

证明: 考虑如下的 Lyapunov 函数

$$V = V_{\omega} + V_p = \frac{1}{2} (\varepsilon_i^{\omega}(t))^T (\mathbf{L} + \mathbf{B}) \varepsilon_i^{\omega}(t) + \frac{1}{2} (\mathbf{P}_i(t))^T \mathbf{L} \mathbf{P}_i(t) \quad (22)$$

式中,  $\varepsilon_i^{\omega} = [\varepsilon_1^{\omega}, \dots, \varepsilon_N^{\omega}]^T$  和  $\mathbf{P}_i = [\kappa_1^p P_1, \dots, \kappa_N^p P_N]^T$ 。对  $V$  求导, 可得

$$\begin{aligned}
\dot{V} = & (\varepsilon_i^{\omega}(t))^T (\mathbf{L} + \mathbf{B}) \dot{\varepsilon}_i^{\omega}(t) + (\mathbf{P}_i(t))^T \dot{\mathbf{L}} \mathbf{P}_i(t) = - \\
& \sum_{i=1}^N \phi_{\omega i}(t) [u_i^{\omega}(t) + \varpi_i^{\omega}(t)] - \sum_{i=1}^N \phi_{p i}(t) [u_i^p(t) + \varpi_i^p(t)]
\end{aligned} \quad (23)$$

根据假设 2, 考虑具有正上限值的有界扰动,

即  $\max \|\omega_i^o(t)\|_\infty \leq \delta_\omega$ , 可以得到

$$-\sum_{i=1}^N \phi_{\omega_i}(t) \omega_i^o(t) \leq \sum_{i=1}^N |\phi_{\omega_i}(t)| |\omega_i^o(t)| \leq \delta_\omega \sum_{i=1}^N |\phi_{\omega_i}(t)| \quad (24)$$

利用引理 1 和事件触发条件, 当不等式(21)成立时, 由式(23)可以得到

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -\alpha_\omega(1-\sigma_1)N^{\frac{n-m}{2n}} \left[ \sum_{i=1}^N (\phi_{\omega_i}(t))^2 \right]^{\frac{m+n}{2n}} - \\ &\quad \beta_\omega(1-\sigma_1) \left[ \sum_{i=1}^N (\phi_{\omega_i}(t))^2 \right]^{\frac{\mu+\nu}{2\mu}} - \\ &\quad \alpha_p(1-\sigma_2)N^{\frac{n-m}{2n}} \left[ \sum_{i=1}^N (\phi_{p_i}(t))^2 \right]^{\frac{m+n}{2n}} - \\ &\quad \beta_p(1-\sigma_2) \left[ \sum_{i=1}^N (\phi_{p_i}(t))^2 \right]^{\frac{\mu+\nu}{2\mu}} \end{aligned} \quad (25)$$

根据  $\phi_{\omega_i}(t)$  和  $\phi_{p_i}(t)$  的定义, 并利用引理 2, 可以得到式(26)。

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -\alpha_\omega(1-\sigma_1)N^{\frac{n-m}{2n}} (2\lambda_1 V_\omega)^{\frac{m+n}{2n}} - \beta_\omega(1-\sigma_1)(2\lambda_1 V_\omega)^{\frac{\mu+\nu}{2\mu}} - \\ &\quad \alpha_p(1-\sigma_2)N^{\frac{n-m}{2n}} (2\lambda_2 V_p)^{\frac{m+n}{2n}} - \beta_p(1-\sigma_2)(2\lambda_2 V_p)^{\frac{\mu+\nu}{2\mu}} \leq - \\ &\quad c_1(V_\omega)^{\frac{m+n}{2n}} - c_2(V_\omega)^{\frac{\mu+\nu}{2\mu}} - c_3(V_p)^{\frac{m+n}{2n}} - c_4(V_p)^{\frac{\mu+\nu}{2\mu}} \end{aligned} \quad (26)$$

其中,  $c_1 = \alpha_\omega(1-\sigma_1)N^{\frac{n-m}{2n}} (2\lambda_1)^{\frac{m+n}{2n}}$ ,  $c_2 = \beta_\omega(1-\sigma_1)(2\lambda_1)^{\frac{\mu+\nu}{2\mu}}$ ,  $c_3 = \alpha_p(1-\sigma_2)N^{\frac{n-m}{2n}} (2\lambda_2)^{\frac{m+n}{2n}}$ ,  $c_4 = \beta_p(1-\sigma_2)(2\lambda_2)^{\frac{\mu+\nu}{2\mu}}$ 。

令  $c_{13} = \min\{c_1, c_3\}$ ,  $c_{24} = \min\{c_2, c_4\}$ , 由式(26)可以得到

$$\dot{V} \leq -c_{13} 2^{\frac{n-m}{2n}} (V)^{\frac{m+n}{2n}} - c_{24} (V)^{\frac{\mu+\nu}{2\mu}} \quad (27)$$

根据引理 3, 次级频率和有功功率次级控制的整定时间  $T$  的上界为

$$T \leq T_{\max} = \frac{2n}{c_{13} 2^{\frac{n-m}{2n}} (m-n)} + \frac{2\mu}{c_{24} (\mu-\nu)} \quad (28)$$

本文提出的基于分布式事件触发的固定时间一致性控制算法(式(12)和式(13))是由 3 个部分组成。前两个部分保证了频率恢复和有功功率分配, 第三部分在满足不等式(21)时可用于消除不确定干扰项。

## 2.2 基于饱和函数的控制算法 DETC-sat

算法 DETC-sat 设计为

$$\begin{aligned} u_i^o(t) &= \\ \alpha_\omega &\left[ \sum_{j=1}^N a_{ij} (\omega_j(t_k^{oi}) - \omega_i(t_k^{oi})) + b_i (\omega_{\text{ref}} - \omega_i(t_k^{oi})) \right]^{\frac{m}{n}} + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\beta_\omega \left[ \sum_{j=1}^N a_{ij} (\omega_j(t_k^{oi}) - \omega_i(t_k^{oi})) + b_i (\omega_{\text{ref}} - \omega_i(t_k^{oi})) \right]^{\frac{\nu}{\mu}} + \\ &\gamma_\omega \text{sat} \left[ \sum_{j=1}^N a_{ij} (\omega_j(t_k^{oi}) - \omega_i(t_k^{oi})) + b_i (\omega_{\text{ref}} - \omega_i(t_k^{oi})) \right] \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} u_i^p(t) &= \alpha_p \left[ \sum_{j=1}^N a_{ij} (\kappa_j^p P_j(t_k^{pi}) - \kappa_i^p P_i(t_k^{pi})) \right]^{\frac{m}{n}} + \\ &\beta_p \left[ \sum_{j=1}^N a_{ij} (\kappa_j^p P_j(t_k^{pi}) - \kappa_i^p P_i(t_k^{pi})) \right]^{\frac{\nu}{\mu}} + \\ &\gamma_p \text{sat} \left[ \sum_{j=1}^N a_{ij} (\kappa_j^p P_j(t_k^{pi}) - \kappa_i^p P_i(t_k^{pi})) \right] \end{aligned} \quad (30)$$

其中,  $\text{sat}(x)$  为

$$\text{sat}(x) = \begin{cases} x/\delta, & |x| \leq \delta \\ \text{sign}(x), & |x| > \delta \end{cases}$$

式中,  $\delta$  是一个较小的正常数。

定理 2: 在分布式固定时间一致性控制算法式(29)和式(30)的作用下, 当式(4)和式(5)满足不等式(21)时, 所有 DGs 的频率恢复和有功功率按比例分配能够在固定时间内完成。其中, 一致性误差满足

$$\begin{cases} (\boldsymbol{\varepsilon}_i^o(t))^\top (\mathbf{L} + \mathbf{B}) \boldsymbol{\varepsilon}_i^o \leq 2 \left( \frac{N\delta\gamma_\omega}{4\sqrt{c_1 c_2}} \right)^{\frac{4n\mu}{\mu(m+n)+n(\mu+\nu)}} \\ (\mathbf{P}_i(t))^\top \mathbf{L} \mathbf{P}_i(t) \leq 2 \left( \frac{N\delta\gamma_p}{4\sqrt{c_3 c_4}} \right)^{\frac{4n\mu}{\mu(m+n)+n(\mu+\nu)}} \end{cases} \quad (31)$$

整定时间  $T$  满足  $T \leq 3T_{\max}$ 。

证明: 当  $|\phi_{\omega_i}(t)| \geq \delta$  和  $|\phi_{p_i}(t)| \geq \delta$  时, 过程同定理 1。在  $T_{\max}$  之后,  $|\phi_{\omega_i}(t)|$ 、 $|\phi_{p_i}(t)|$ 、 $|\varphi_{\omega_i}(t)|$  和  $|\varphi_{p_i}(t)|$  将保持在  $|\phi_{\omega_i}(t)| \leq \delta$ 、 $|\phi_{p_i}(t)| \leq \delta$ 、 $|\varphi_{\omega_i}(t)| \leq \delta$ 、 $|\varphi_{p_i}(t)| \leq \delta$ 。根据式(23)和饱和函数的定义, 当不等式(21)成立时, 可以得到

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -\alpha_\omega(1-\sigma_1)N^{\frac{n-m}{2n}} \left[ \sum_{i=1}^N (\phi_{\omega_i}(t))^2 \right]^{\frac{m+n}{2n}} - \\ &\quad \alpha_p(1-\sigma_2)N^{\frac{n-m}{2n}} \left[ \sum_{i=1}^N (\phi_{p_i}(t))^2 \right]^{\frac{m+n}{2n}} - \\ &\quad \beta_\omega(1-\sigma_1) \left[ \sum_{i=1}^N (\phi_{\omega_i}(t))^2 \right]^{\frac{\mu+\nu}{2\mu}} + \frac{N\delta\gamma_\omega}{4} - \\ &\quad \beta_p(1-\sigma_2) \left[ \sum_{i=1}^N (\phi_{p_i}(t))^2 \right]^{\frac{\mu+\nu}{2\mu}} + \frac{N\delta\gamma_p}{4} - \\ &\quad \left\{ \frac{\gamma_\omega}{N\delta} \left[ \sum_{i=1}^N |\phi_{\omega_i}(t)|^2 - \gamma_\omega \sum_{i=1}^N |\phi_{\omega_i}(t)| + \frac{N\delta\gamma_\omega}{4} \right] - \right. \\ &\quad \left. \left\{ \frac{\gamma_p}{N\delta} \left[ \sum_{i=1}^N |\phi_{p_i}(t)|^2 - \gamma_p \sum_{i=1}^N |\phi_{p_i}(t)| + \frac{N\delta\gamma_p}{4} \right] \right\} \leq \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -\frac{c_1}{2}(\mathbf{V}_\omega)^{\frac{m+n}{2n}} - \frac{c_2}{2}(\mathbf{V}_\omega)^{\frac{\mu+v}{2\mu}} - \\
 & \frac{c_3}{2}(\mathbf{V}_p)^{\frac{m+n}{2n}} - \frac{c_4}{2}(\mathbf{V}_p)^{\frac{\mu+v}{2\mu}} + \\
 & \left[ \frac{N\delta\gamma_\omega}{4} - \frac{c_1}{2}(\mathbf{V}_\omega)^{\frac{m+n}{2n}} - \frac{c_2}{2}(\mathbf{V}_\omega)^{\frac{\mu+v}{2\mu}} \right] + \\
 & \left[ \frac{N\delta\gamma_p}{4} - \frac{c_3}{2}(\mathbf{V}_p)^{\frac{m+n}{2n}} - \frac{c_4}{2}(\mathbf{V}_p)^{\frac{\mu+v}{2\mu}} \right]
 \end{aligned} \tag{32}$$

若式(32)满足  $\frac{c_1}{2}(\mathbf{V}_\omega)^{\frac{m+n}{2n}} + \frac{c_2}{2}(\mathbf{V}_\omega)^{\frac{\mu+v}{2\mu}} \geq \frac{N\delta\gamma_\omega}{4}$  和

$$\frac{c_3}{2}(\mathbf{V}_p)^{\frac{m+n}{2n}} + \frac{c_4}{2}(\mathbf{V}_p)^{\frac{\mu+v}{2\mu}} \geq \frac{N\delta\gamma_p}{4}, \text{ 可以得到}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{\mathbf{V}} & \leq -\frac{c_1}{2}(\mathbf{V}_\omega)^{\frac{m+n}{2n}} - \frac{c_3}{2}(\mathbf{V}_p)^{\frac{m+n}{2n}} - \frac{c_2}{2}(\mathbf{V}_\omega)^{\frac{\mu+v}{2\mu}} - \\
 & \frac{c_4}{2}(\mathbf{V}_p)^{\frac{\mu+v}{2\mu}} \leq -\frac{c_{13}}{2} \cdot 2^{\frac{n-m}{2n}} \cdot (\mathbf{V})^{\frac{m+n}{2n}} - \frac{c_{24}}{2}(\mathbf{V})^{\frac{\mu+v}{2\mu}}
 \end{aligned} \tag{33}$$

根据  $\sqrt{c_1 c_2} \mathbf{V}^{\frac{m+n}{4n} + \frac{\mu+v}{4\mu}} \leq \frac{c_1}{2}(\mathbf{V}_\omega)^{\frac{m+n}{2n}} + \frac{c_2}{2}(\mathbf{V}_\omega)^{\frac{\mu+v}{2\mu}}$ ,

$\sqrt{c_3 c_4} \mathbf{V}^{\frac{m+n}{4n} + \frac{\mu+v}{4\mu}} \leq \frac{c_3}{2}(\mathbf{V}_p)^{\frac{m+n}{2n}} + \frac{c_4}{2}(\mathbf{V}_p)^{\frac{\mu+v}{2\mu}}$ , 可以得到

$$(\boldsymbol{\varepsilon}_i^\omega(t))^\top (\mathbf{L} + \mathbf{B}) \boldsymbol{\varepsilon}_i^\omega \leq 2 \left( \frac{N\delta\gamma_\omega}{4\sqrt{c_1 c_2}} \right)^{\frac{4n\mu}{\mu(m+n)+n(\mu+v)}} \text{ 以及}$$

$$(\mathbf{P}_i(t))^\top \mathbf{L} \mathbf{P}_i(t) \leq 2 \left( \frac{N\delta\gamma_p}{4\sqrt{c_3 c_4}} \right)^{\frac{4n\mu}{\mu(m+n)+n(\mu+v)}}. \text{ 整定时间 } T \text{ 满}$$

足  $T \leq 3T_{\max}$ , 证明完毕。

定理 3: 对于具有未知外部扰动的微电网系统, 在控制算法式(30)和事件触发函数式(20)下不存在 Zeno 行为。

Zeno 行为是指在连续时间中事件无限次触发, 导致系统状态在有限时间内无法达到稳定状态。在微电网中加入一定的信号干扰会使得控制器频繁触发, 出现 Zeno 行为。本文在控制算法的设计部分考虑到了外部扰动的影响, 并采用了有效的控制方法, 从而避免了 Zeno 行为。

证明: 根据式(33), 可以推导出  $\mathbf{V}_p$  是有界的, 从而可以得到  $\kappa_i^p \dot{\mathbf{P}}_i$  是有界的。假设所有 DGs 的  $\mathbf{V}_p$  和  $\kappa_i^p \dot{\mathbf{P}}_i$  的上限分别为  $X_1$  和  $X_2$ 。

根据引理 2, 可以得到  $\sum_{i=1}^N (\phi_{pi}(t))^2 \geq$

$$\lambda_N (\mathbf{P}_i(t))^\top \mathbf{L} \mathbf{P}_i(t) = 2\lambda_N \mathbf{V}_p.$$

根据测量误差  $e_i^p(t)$  以及中间变量  $\phi_{pi}(t)$ 、 $\varphi_{pi}(t)$

的定义, 当  $|\phi_{pi}(t)| \leq \delta$ ,  $|\varphi_{pi}(t)| \leq \delta$  时, 有

$$\begin{aligned}
 & |\dot{e}_i^p(t)| = \\
 & \left\{ \alpha_p \frac{m}{n} [|\varphi_{pi}(t)|^n]^{\frac{m-n}{n}} + \beta_p \frac{v}{\mu} [|\varphi_{pi}(t)|^{\frac{v-\mu}{\mu}}]^{\frac{v-\mu}{\mu}} + \frac{\gamma_p}{\delta} \right\} |\dot{\phi}_{pi}(t)| \leq \\
 & \left\{ \alpha_p \frac{m}{n} [(\varphi_{pi}(t))^2]^{\frac{m-n}{2n}} + \beta_p \frac{v}{\mu} [(\varphi_{pi}(t))^2]^{\frac{v-\mu}{2\mu}} + \right. \\
 & \left. \frac{\gamma_p}{\delta} \right\} \left| \sum_{j=1}^N a_{ij} (u_j(t_k^{pi}) + \varpi_i^p(t_k^{pi}) - u_i(t) - \varpi_i^p(t)) \right| \leq \\
 & \left\{ \alpha_p \frac{m}{n} (2\lambda_N X_1)^{\frac{m-n}{2n}} + \beta_p \frac{v}{\mu} (2\lambda_N X_1)^{\frac{v-\mu}{2\mu}} + \right. \\
 & \left. \frac{\gamma_p}{\delta} \right\} \left( \left| \sum_{j=1}^N a_{ij} X_2 \right| + 2l_{ii} \partial_p \right) \leq (\eta_1 + \eta_2 + \frac{\gamma_p}{\delta}) \eta_3
 \end{aligned} \tag{34}$$

其中,  $\eta_1 = \alpha_p \frac{m}{n} (2\lambda_N X_1)^{\frac{m-n}{2n}}$ ,  $\eta_2 = \beta_p \frac{v}{\mu} (2\lambda_N X_1)^{\frac{v-\mu}{2\mu}}$ ,

$$\eta_3 = \left| \sum_{j=1}^N a_{ij} X_2 \right| + 2l_{ii} \partial_p.$$

对于每一个  $t \in [t_k^{pi}, t_{k+1}^{pi})$ , 可以进一步得到

$$|e_i^p(t)| \leq \int_{t_k^{pi}}^t |\dot{e}_i^p(s)| ds \leq \int_{t_k^{pi}}^t (\eta_1 + \eta_2 + \frac{\gamma_p}{\delta}) \eta_3 ds \tag{35}$$

根据触发条件式(20), 在  $g_i^p(t) = 0$  或等价于

$|e_i^p(t)| = \sigma_2 \alpha_p |\varphi_{pi}(t)|^{\frac{m}{n}} + \sigma_2 \beta_p |\varphi_{pi}(t)|^{\frac{v}{\mu}} + \sigma_2 \gamma_p$  之前, DG  $i$  的下一个事件不会被触发。根据式(35), 可以得到

$$\begin{aligned}
 |e_i^p(t_{k+1}^{pi})| & = \sigma_2 \alpha_p \frac{m}{n} |\varphi_p(t_{k+1}^{pi})|^{\frac{m}{n}} + \sigma_2 \beta_p \frac{v}{\mu} |\varphi_p(t_{k+1}^{pi})|^{\frac{v}{\mu}} + \\
 & \sigma_2 \gamma_p \leq \int_{t_k^{pi}}^{t_{k+1}^{pi}} (\eta_1 + \eta_2 + \frac{\gamma_p}{\delta}) \eta_3 ds
 \end{aligned} \tag{36}$$

根据事件触发条件  $g_i^p(t) > 0$ , 以及式(36), 可以得到

$$t_{k+1}^{pi} - t_k^{pi} \geq \frac{\sigma_2 \gamma_p}{(\eta_1 + \eta_2 + \frac{\gamma_p}{\delta}) \eta_3} > 0 \tag{37}$$

因此, 所提出的有功功率事件触发控制机制不存在 Zeno 行为。频率的事件触发机制不存在 Zeno 行为的证明方法同有功功率。

### 3 仿真研究

为验证固定时间分布式鲁棒二次控制算法的有效性, 本文在 Matlab/Simulink 环境中搭建了孤岛微电网系统, 包括 4 个 DG, 它们在无向图下通信, 4

条传输线路和 4 个局部负荷, 如图 3 所示。详细的电力参数<sup>[28]</sup>如表 1 所示。

假设只有 DG1 可以接收参考值信息, 其中, 频率参考值为 50 Hz, 电压幅值参考值为 311 V。设置控制增益  $\alpha_\omega = \alpha_p = \alpha_v = 18$ ,  $\beta_\omega = \beta_p = \alpha_v = 20$ ,  $\gamma_\omega = \gamma_p = 6$ ,  $\gamma_v = 20$ ; 参数  $m/n = 9/7$ ,  $v/\mu = 3/5$ ,  $\sigma_1 = 0.15$ ,  $\sigma_2 = 0.1$ ,  $\sigma_v = 0.45$ 。为了方便后续的仿真实验, 将频率和有功功率的外部有界扰动设置为  $\varpi_f(t) = 0.1\cos(5\pi t)$ , 电压的外部有界扰动设置为  $\varpi_v(t) = 2\cos(5\pi t)$ 。

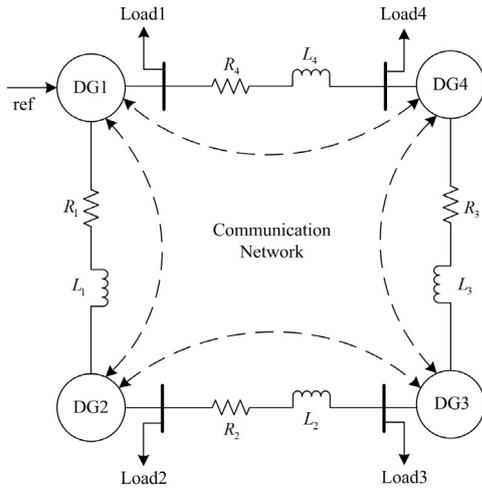


图 3 微电网系统仿真结构图

Fig. 3 Simulation structure of microgrid system

表 1 微电网仿真系统参数

Table 1 Microgrid simulation system parameters

参数	DG1	DG2	DG3	DG4
$\kappa_f^p (\times 10^{-5})$	7.92	6.53	7.31	6.9
$\kappa_f^d (\times 10^{-4})$	9.43	7.26	9.17	7.88
$P_i^{\max}/\text{kW}$	78.976	95.787	85.566	90.651
参数	Line1	Line2	Line3	Line4
$R_i/\Omega$	0.79	0.54	0.26	0.75
$L_i/\text{mH}$	0.95	1.5	0.38	0.72
参数	Load1	Load2	Load3	Load4
$P_{\text{Load}}/\text{kW}$	32.75	40.4	37.5	43.15
$Q_{\text{Load}}/\text{kvar}$	12.45	16.2	12.6	29.8

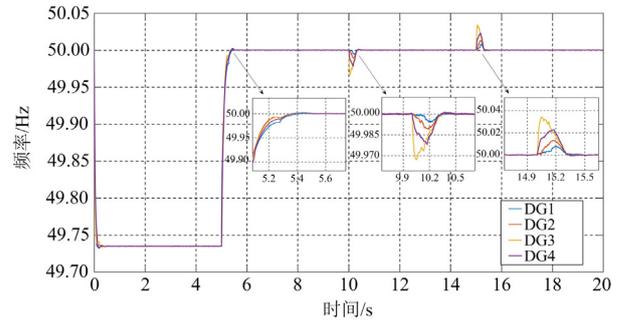
本次仿真为了验证所提控制策略在负荷扰动情况下的性能, 设置一个额外的负荷接入 DG3 总线一侧, 在连接与断开中进行模拟仿真。具体仿真过程如下:

- (1)  $t = 0 \sim 5$  s, 仅在初级控制层工作;
- (2)  $t = 5 \sim 10$  s, 在二次控制层采用本文所提出的分布式固定时间一致性控制策略;
- (3)  $t = 10 \sim 15$  s, 将  $L_{\text{Load}} = 13 \text{ kW} + \text{j}10 \text{ kvar}$  的

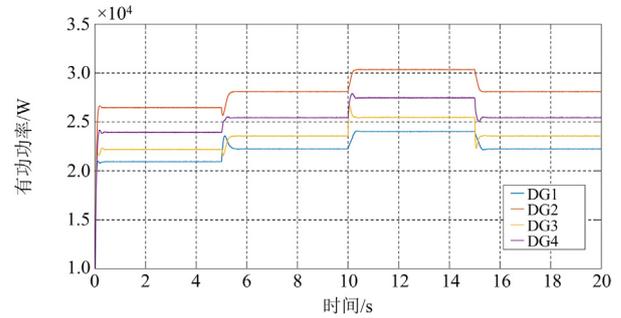
固定负荷接入总 DG3 线一侧;

- (4)  $t = 15 \sim 20$  s, 负荷  $L_{\text{Load}}$  断开连接。

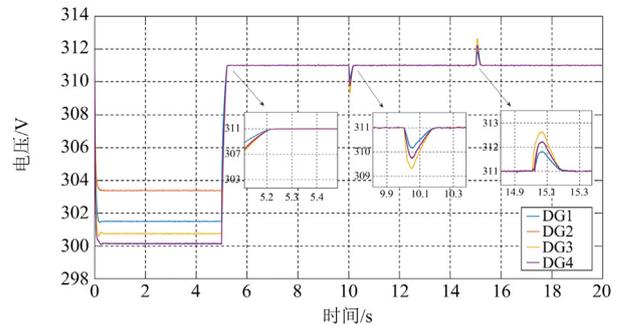
图 4 给出了微电网系统在负荷扰动情况下各 DG 的频率、有功功率和电压幅值的响应曲线。从图中可以看出, 在 0~5 s 内, 仅在初级控制层采用下垂控制, DG 的频率和电压都能够在相应的值达到稳定, 但该值明显偏离了参考值。为了消除偏差, 在 5 s 后将本文所提的二次控制策略应用到孤岛微电网系统中, 系统的频率和输出电压幅值可以快速恢复到预先设定的参考值。由定理 1 计算得出 DETC-sign 算法的频率和电压幅值恢复的整定时间



(a) 频率



(b) 有功功率



(c) 电压

图 4 DETC-sign 算法的控制器式(12)和式(13)下的各 DG 频率、有功功率和电压响应曲线

Fig. 4 Frequency, active power, and voltage response curves of each DG under controllers (12) and (13) of the DETC-sign algorithm

上界分别为 2.57 s 和 3.97 s，而仿真结果显示，频率和电压幅值的收敛速度分别为 0.50 s 和 0.21 s，两者均小于其整定时间上界，验证了所提固定时间二次控制策略的有效性。

本文 DETC-sat 算法采用饱和函数的形式以缓解符号函数引起的抖动问题，设置参数  $\delta = 0.05$ 。仿真结果如图 5 所示，频率和电压幅值的收敛时间分别为 0.40 s 和 0.23 s，两者收敛时间均小于  $3T_{max}$ 。选取 DG1 进行对比，其对应控制器式(12)、式(29)的控制输入如图 6 所示，可以看出采用饱和函数设计的控制器式(12)的抖动幅度明显小于采用函数设计的控制器式(19)。

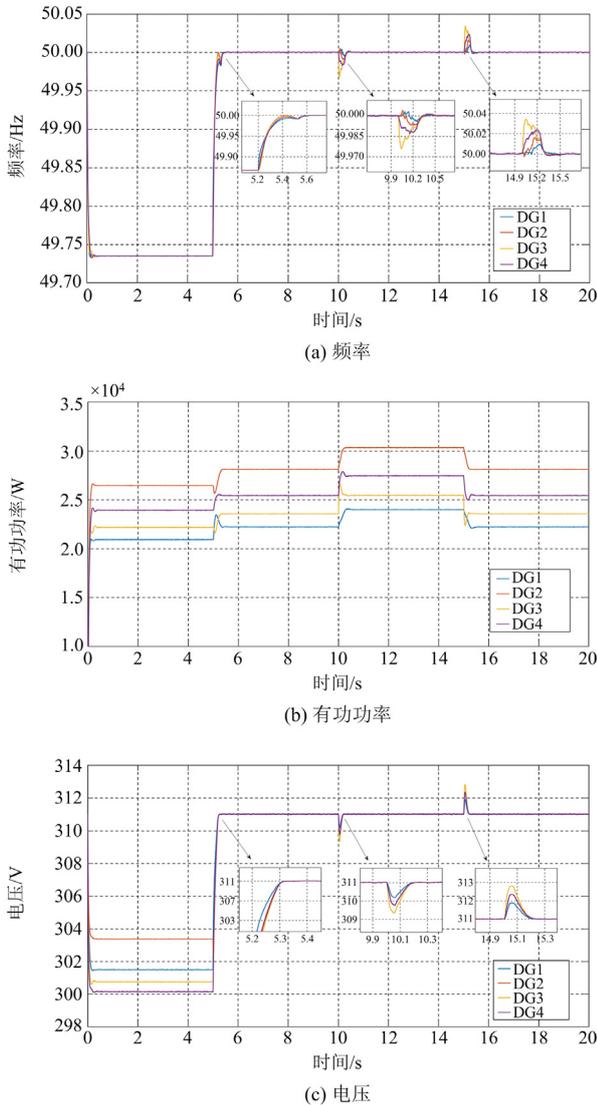


图 5 DETC-sat 算法的控制器式(29)和式(30)下的各 DG 频率、有功功率和电压响应曲线

Fig. 5 Frequency, active power, and voltage response curves of each DG under controllers (29) and (30) of the DETC-sat algorithm

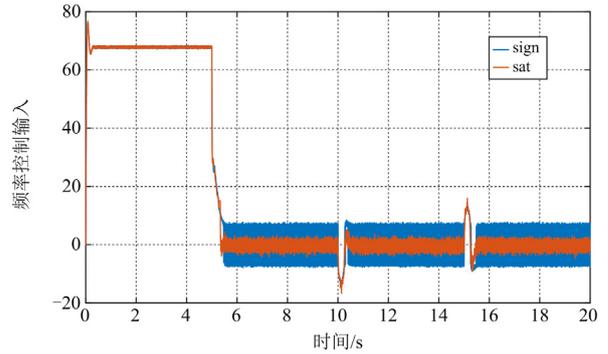


图 6 控制器式(12)和式(29)的控制输入的抖动状态对比  
Fig. 6 Comparison of the jitter states of the control inputs of controllers (12) and (29)

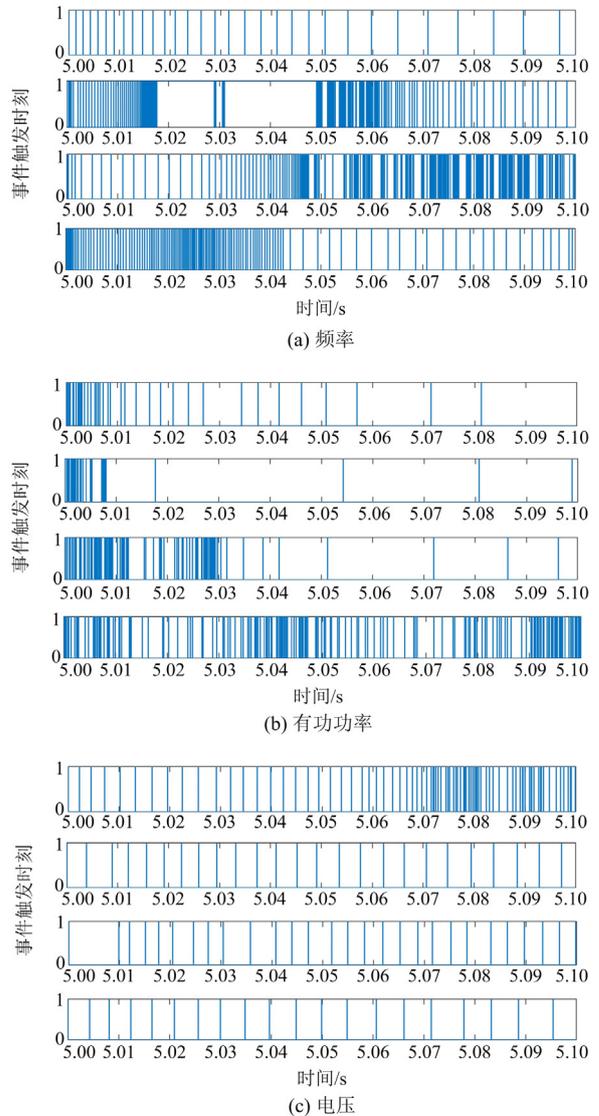


图 7 DETC-sign 算法的控制器事件触发次数  
Fig. 7 Controller event-triggered times for the DETC-sign algorithm

### 3.1 同抗干扰能力下的不同事件触发机制对比

图7呈现了DETC-sign算法中各个DG在分布式事件触发的控制算法下 $t=5\sim 5.1\text{s}$ 的触发次数,1代表触发,0代表未触发。为了进一步说明本文改进的分布式事件触发机制的优越性,与文献[26]采用的一般分布式事件触发机制的控制策略对比,对比结果见表2(两个事件触发机制20s内总的触发次数)。可以明显看出,在两者控制策略的收敛速度、抗扰等性能相差甚微的情况下(见图8),本文采用的分布式事件触发机制的通信次数远小于文献[26],更好地减轻了系统通信的负载。

表2 不同分布式触发机制下的触发次数比较

Table 2 Comparison of triggering times under different distributed triggering mechanisms

研究对象	触发机制	DG1	DG2	DG3	DG4
频率	DETC-sign	98 048	94 354	91 325	97 498
二次控制	文献[26]	29 4232	297 042	296 057	297 791
有功功率	DETC-sign	12 4875	135 428	128 804	133 041
二次控制	文献[26]	29 5332	296 143	296 750	298 718
电压	DETC-sign	39 515	32 268	41 349	27 357
二次控制	文献[26]	297 439	296 306	292 464	295 161

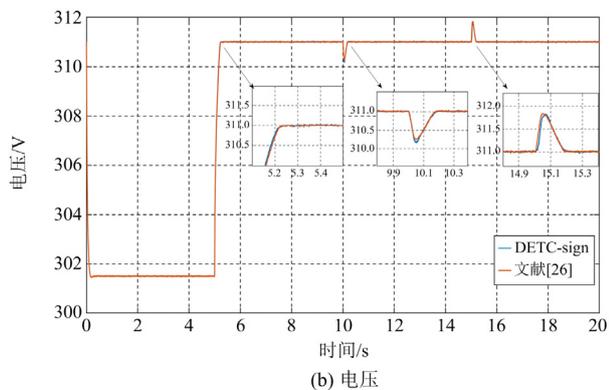
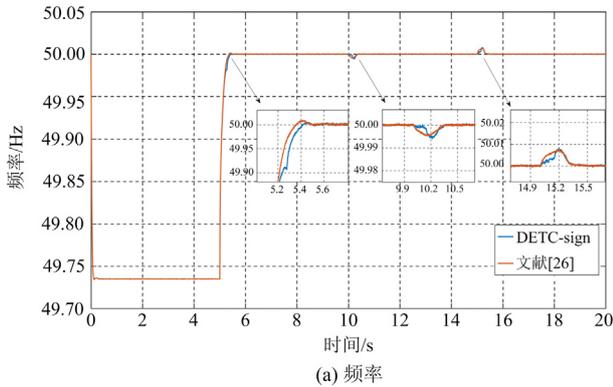


图8 控制器式(12)与文献[26]的分布式事件触发机制对比  
Fig. 8 Comparison of distributed event triggering mechanisms between controller (12) and reference [26]

### 3.2 同触发机制下的控制策略对比

在考虑不确定干扰的情况下,为了验证本文所提控制策略的优越性,将DETC-sat算法与文献[21]进行性能比较。两者以DG1为例,在相同参数下基于相同事件触发策略进行仿真实验,对比结果如图9所示。其中文献[21]为利用分数功率积分器的性质构造的分布式鲁棒固定时间二次控制算法。由图9可见,本文在通信次数更少的情况下(见表3),所提的控制策略具有更快的收敛速度以及更好的鲁棒性能。

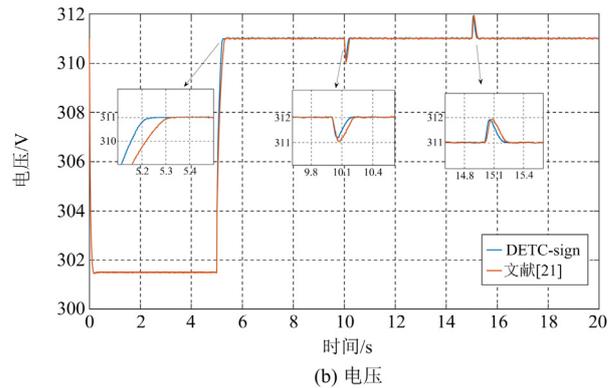
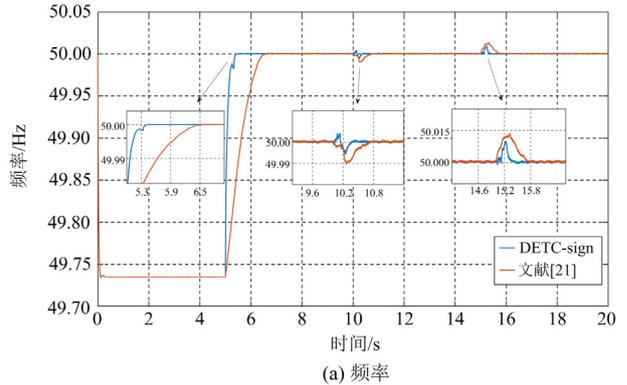


图9 DG1的控制策略对比

Fig. 9 Comparison of control strategies for DG1

表3 DETC-sat算法和NMS算法的触发次数比较

Table 3 Comparison of triggering times between DETC-sat algorithm and NMS algorithm

研究对象	触发机制	DG1	DG2	DG3	DG4
频率	DETC-sat	18 128	11 820	12 143	14 233
二次控制	文献[21]	37 355	40 564	36 640	40 588
有功功率	DETC-sat	18 636	20 590	19 558	22 039
二次控制	文献[21]	50 361	61 717	54 073	56 413
电压	DETC-sat	30 538	19 605	23 279	22 483
二次控制	文献[21]	36 971	29 840	38 975	25 684

### 3.3 验证控制策略的抗扰性能

对于本文所提控制算法的抗干扰性能,当参数

$\gamma_{\omega}$  和  $\gamma_p$  等于 0 时,  $u_i^{\omega}(t)$  和  $u_i^p(t)$  无法消除扰动。从消除扰动与未消除扰动的系统中各选取 DG1 作为参考进行对比, 如图 10 所示。可以明显看出, 未消除扰动的仿真图部分波动更加严重, 这会影响系统的稳定性和安全性。因此, 本文的分布式鲁棒固定时间二次控制算法能够有效抑制干扰的影响, 具有较好的抗干扰性能。

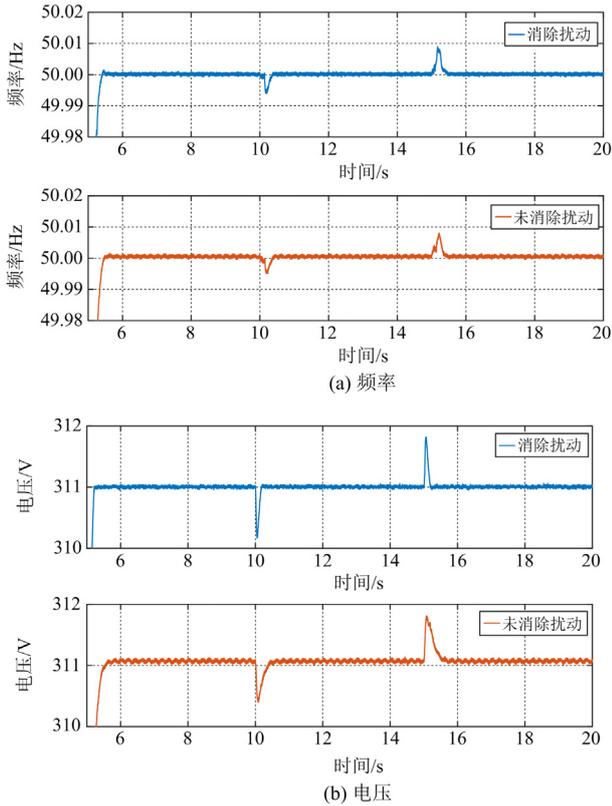


图 10 有无抗扰动能力的 DG1 频率和电压响应曲线对比  
Fig. 10 Comparison of DG1 frequency and voltage response curves with and without disturbance rejection capability

#### 4 结论

本文提出了一种固定时间分布式鲁棒二次控制算法, 实现未知扰动下的孤岛微电网输出频率和电压协同控制。所提出的一致性算法能够有效节约通信资源, 抑制不确定干扰, 并借助固定时间稳定性理论, 建立了一致性条件并得出了收敛时间上界, 且该上界不依赖系统的初始条件。同时, 为了缓解符号函数带来的抖动现象, 在控制器中引入饱和函数, 并排除了 Zeno 行为。最后, 通过对比实验验证本文控制算法的优越性, 结果表明所提算法在未知扰动、负载变化情况下, 依旧可以迅速恢复到额定值, 并具有较快的收敛速度和较强的抗干扰性。

#### 参考文献

- [1] SHETA A N, ABDULSALAM G M, SEDHOM B E, et al. Comparative framework for AC-microgrid protection schemes: challenges, solutions, real applications, and future trends[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(2): 363-402.
- [2] 米阳, 钱翌明, 张浩杰, 等. 考虑通信异常的直流微电网储能单元分布式协调控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(13): 50-59.  
MI Yang, QIAN Yiming, ZHANG Haojie, et al. Distributed coordinated control of a DC microgrid energy storage unit considering abnormal communication[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(13): 50-59.
- [3] 孙佳航, 王小华, 黄景光, 等. 基于 MPC-VSG 的孤岛微电网频率和电压动态稳定控制策略[J]. 中国电力, 2023, 56(6): 51-60, 81.  
SUN Jiahang, WANG Xiaohua, HUANG Jingguang, et al. MPC-VSG based control strategy for dynamic stability of frequency and voltage in islanded microgrid[J]. Electric Power, 2023, 56(6): 51-60, 81.
- [4] 卢开诚, 刘铠诚, 董树锋. 基于模糊单神经元 PI 的微电网频率自适应控制[J]. 电力工程技术, 2022, 41(5): 131-139.  
LU Kaicheng, LIU Kaicheng, DONG Shufeng. A microgrid frequency control method based on fuzzy single neuron adaptive PI control[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5): 131-139.
- [5] 刘佳, 罗惠雄, 张小华, 等. 考虑停电损失及可中断负荷的有源配网鲁棒孤岛划分策略[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(2):141-149.  
LIU Jia, LUO Huixiong, ZHANG Xiaohua, et al. Robust islanding strategy for active distribution network considering outage loss and interruptible load[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(2):141-149.
- [6] 梁海峰, 丁政, 李鹏. 基于改进一致性算法的孤岛直流微电网储能系统分布式控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(16): 59-71.  
LIANG Haifeng, DING Zheng, LI Peng. Distributed control strategy of an energy storage system in an isolated DC microgrid based on an improved consensus algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(16): 59-71.
- [7] 薛飞, 李宏强, 田蓓, 等. 储能辅助的孤岛微网自适应事件触发二次调频策略[J]. 中国电力, 2023, 56(9): 196-205.  
XUE Fei, LI Hongqiang, TIAN Bei, et al. Adaptive event-triggered secondary frequency control in islanded microgrids with auxiliary energy storage systems[J]. Electric Power, 2023, 56(9): 196-205.
- [8] YAZDANIAN M, MEHRIZI-SANI A. Distributed control techniques in microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(6): 2901-2909.
- [9] DADI R, MEENAKSHY K, DAMODARAN S K. A review on secondary control methods in DC microgrid[J]. Journal of Operation and Automation in Power Engineering, 2023, 11(2): 105-112.

- [10] XU Yinliang, SUN Hongbin. Distributed finite-time convergence control of an islanded low-voltage AC microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 33(3): 2339-2348.
- [11] 丁雨, 于艾清, 高纯. 基于改进一致性算法的独立光储直流微电网电压稳定能量协调策略[J]. 中国电力, 2022, 55(3): 74-79.  
DING Yu, YU Aiqing, GAO Chun. An energy coordination strategy for island dc microgrid with photovoltaic and storage system based on improved consensus algorithm[J]. Electric Power, 2022, 55(3): 74-79.
- [12] YU Jianglong, DONG Xiwang, LI Qingdong, et al. Practical time-varying formation tracking for second-order nonlinear multiagent systems with multiple leaders using adaptive neural networks[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2018, 29(12): 6015-6025.
- [13] 吴银平, 王荣浩, 秦霞. 多智能体一致性算法在孤岛微电网二次控制中的应用[J]. 动力学与控制学报, 2023, 21(1): 18-29.  
WU Yinping, WANG Ronghao, QIN Xia. Application of multi-agent consistency algorithm in secondary control of island microgrid[J]. Journal of Dynamics and Control, 2023, 21(1): 18-29.
- [14] HU Shunwei, HE Liping, ZHAO Haodong, et al. Distributed secondary control of microgrids with unknown disturbances and non-linear dynamics[J]. Frontiers in Energy Research, 2023, 10(1): 1-9.
- [15] NING Boda, HAN Qinglong, DING Lei. Distributed secondary control of AC microgrids with external disturbances and directed communication topologies: a full-order sliding-mode approach[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2020, 8(3): 554-564.
- [16] DEHKORDI N M, SADATI N, HAMZEH M. Distributed robust finite-time secondary voltage and frequency control of islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 32(5): 3648-3659.
- [17] 张玉芳, 赵婵娟, 程志友, 等. 考虑通信拓扑切换的微电网有限时间分布式二级控制[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(8): 149-159.  
ZHANG Yufang, ZHAO Chanjuan, CHENG Zhiyou, et al. Distributed finite-time secondary control of a microgrid with communication topology switching[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(8): 149-159.
- [18] PARSEGOV S E, POLYAKOV A E, SHCHERBAKOV P S. Fixed-time consensus algorithm for multi-agent systems with integrator dynamics[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2013, 46(27): 110-115.
- [19] GHAZZALI M, HALOUA M, GIRI F. Fixed-time observer-based distributed secondary voltage and frequency control of islanded AC microgrids[J]. International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), 2020, 10(5): 4522-4533.
- [20] GHAZZALI M, HALOUA M, GIRI F. Fixed-time distributed voltage and reactive power compensation of islanded microgrids using sliding-mode and multi-agent consensus design[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2020, 10(1): 232-240.
- [21] SHRIVASTAVA S, SUBUDHI B. Robust finite-time secondary control scheme for islanded microgrid with nonlinear dynamics and uncertain disturbances[C] // 2019 IEEE 5th International Conference for Convergence in Technology (I2CT), March 29-31, 2019, Pune, India: 1-6.
- [22] NI Junkang, SHI Peng, ZHAO Yu, et al. Fixed-time event-triggered output consensus tracking of high-order multiagent systems under directed interaction graphs[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2020, 52(7): 6391-6405.
- [23] XU Deming, LI Ze, CUI Gongzeng, et al. Distributed fixed-time secondary control of an islanded microgrid via distributed event-triggered mechanism[J]. International Journal of Control, 2023, 96(5): 1146-1164.
- [24] LIU Jian, YU Yao, SUN Jia, et al. Distributed event-triggered fixed-time consensus for leader-follower multiagent systems with nonlinear dynamics and uncertain disturbances[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2018, 28(11): 3543-3559.
- [25] LIU Jian, ZHANG Yanling, YU Yao, et al. Fixed-time event-triggered consensus for nonlinear multiagent systems without continuous communications[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2018, 49(11): 2221-2229.
- [26] ZHAO Daduan, ZHANG Chenghui, SUN Yue, et al. Distributed robust frequency restoration and active power sharing for autonomous microgrids with event-triggered strategy[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(5): 3819-3834.
- [27] ZUO Shan, DAVOUDI A, SONG Yongduan, et al. Distributed finite-time voltage and frequency restoration in islanded AC microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(10): 5988-5997.
- [28] 许德明, 李泽, 崔国增, 等. 孤岛微电网异构电池储能系统的分布式有限时间次级控制[J]. 控制与决策, 2021, 36(8): 2034-2041.  
XU Deming, LI Ze, CUI Guozeng, et al. Distributed finite-time secondary control for heterogeneous battery energy storage systems in an islanded microgrid[J]. Control and Decision, 2021, 36(8): 2034-2041.

收稿日期: 2023-11-06; 修回日期: 2024-01-20

作者简介:

曹晓(2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为微电网分布式协同控制、建筑智能化; E-mail: cx20000110cx@163.com

李泽(1983—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为复杂模糊系统、随机系统与滞滞系统的智能控制、建筑智能化等; E-mail: lizeing@163.com

崔国增(1986—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为非线性系统自适应控制、多智能体系统分布式控制及其应用。E-mail: guozengcui@gmail.com

(编辑 张颖)