

# 控制与决策

Control and Decision

## 基于多智能体的太阳能无人机能源控制

吕冬翔, 张志成, 朱立宏, 李鹏, 呼文韬, 李钊, 左志强

引用本文:

吕冬翔, 张志成, 朱立宏, 李鹏, 呼文韬, 李钊, 左志强. 基于多智能体的太阳能无人机能源控制[J]. *控制与决策*, 2023, 38(2): 372–378.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.1133>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 分布式无人机队列控制与动态障碍规避设计

Distributed unmanned aerial vehicle platoon control with dynamic obstacle avoidance  
*控制与决策*. 2022, 37(9): 2226–2234 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0141>

#### 基于分布式模型预测控制的无人机编队控制

Formation control of multi-UAV based on distributed model predictive control algorithm  
*控制与决策*. 2022, 37(7): 1763–1771 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0447>

#### 基于神经网络的电力系统暂态稳定分布式自适应控制

Neural network-based distributed adaptive control for power system transient stability  
*控制与决策*. 2021, 36(6): 1407–1414 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1168>

#### 分布式无人机的时变编队非线性控制设计

Time-varying formation nonlinear control of distributed multiple UAVs  
*控制与决策*. 2021, 36(10): 2490–2496 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0136>

#### 一种具有非线性动力学模型的智能电网快速分布式控制

A fast distributed control of smart grids with nonlinear dynamic model  
*控制与决策*. 2021, 36(8): 1849–1854 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1696>

# 基于多智能体的太阳能无人机能源控制

吕冬翔<sup>1</sup>, 张志成<sup>2</sup>, 朱立宏<sup>1</sup>, 李鹏<sup>2</sup>, 呼文韬<sup>1</sup>, 李钊<sup>1</sup>, 左志强<sup>2†</sup>

(1. 中国电子科技集团公司第十八研究所, 天津 300384;

2. 天津大学 电气自动化与信息工程学院, 天津 300072)

**摘要:** 为满足太阳能无人机对长航时飞行和高载重能力的需求, 研究能源系统的储能均衡控制问题. 通过将太阳能无人机中每个由光伏-储能-输出单元组成的发电节点作为一个智能体, 设计基于多智能体的分布式控制器并给出满足系统约束的控制算法, 实现储能单元荷电状态的一致性. 分别针对连续系统模型和离散系统模型给出分布式控制协议, 并通过理论分析说明连续和离散的控制协议均可实现控制目标. 通过搭建半实物平台进行实测验证, 采用光伏模拟器和电子负载模拟能源系统运行的外部环境, 以 18 650 锂离子电池作为储能单元, 实验结果表明, 分布式协同控制协议能够有效地解决光伏功率不均及电池参数差异导致的不均衡问题, 使系统的充放电深度得以有效提升.

**关键词:** 太阳能无人机; 能源系统; 多智能体系统; 连续/离散模型; 分布式控制; 储能均衡

中图分类号: TP373

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.1133

引用格式: 吕冬翔, 张志成, 朱立宏, 等. 基于多智能体的太阳能无人机能源控制[J]. 控制与决策, 2023, 38(2): 372-378.

## Multi-agent based energy control for solar unmanned aerial vehicles

LV Dong-xiang<sup>1</sup>, ZHANG Zhi-cheng<sup>2</sup>, ZHU Li-hong<sup>1</sup>, LI Peng<sup>2</sup>, HU Wen-tao<sup>1</sup>, LI Chuan<sup>1</sup>, ZUO Zhi-qiang<sup>2†</sup>

(1. Tianjin Institute of Power Sources, Tianjin 300384, China; 2. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** Considering the energy supply-demand of solar-powered unmanned aerial vehicles for long-distance flight, this paper investigates the storage balance control problem of the energy system. By taking each power generation in the vehicles as an agent, which is composed of photovoltaic cells, a storage system, and a power output unit, distributed control protocols based on the multi-agent theory are designed to achieve the state-of-charge balance of the energy storage unit, and a corresponded algorithm is proposed to satisfy the constraints of the system. Distributed control protocols are designed for continuous models and discrete models, respectively, and theoretical analysis shows that both the control protocols can achieve our objective. The effectiveness of the proposed control protocols is verified in the semi-physical platform, where the photovoltaic simulator and electronic load are used to establish the operational environment of the energy system, and the 18 650 lithium-ion batteries are chosen as the storage unit. The results show that the proposed protocols can effectively solve the unbalance problem caused by the difference of photovoltaic power and battery parameters, and consequently improve the depth of charging/discharging.

**Keywords:** solar unmanned aerial vehicle; energy system; multi-agent system; continuous/discrete model; distributed cooperative control; energy storage balance

## 0 引言

随着临近空间技术的发展, 太阳能无人机凭借其运行成本低、滞空时间长等优点开始大规模应用在各个领域, 成为当前研究的热点<sup>[1-4]</sup>. 太阳能无人机采用太阳能作为能量来源, 通过最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)有效利用光伏

电池转换的电能, 维持无人机动力系统、航电设备及机载载荷的正常工作, 并通过电气母线向飞机机载储能电池充电, 保证夜间或者太阳光照不足时无人机能够释放储能电池中的电能, 实现飞机的正常运行.

太阳能无人机在飞行过程中面临着诸多挑战: 1) 高空环境的多变性导致飞行过程中能源系统的供给

收稿日期: 2021-06-29; 录用日期: 2021-11-10.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61933014, 61773281, 62173243).

†通讯作者. E-mail: zqzuo@tju.edu.cn.

并不是恒定的,在遇到恶劣天气或者越夜时,飞行器只能依靠储能电池的电量继续飞行.因此,储能电池的均衡性研究十分关键<sup>[5-6]</sup>,其在很大程度上影响着太阳能飞行器的续航时间.2)由于太阳能无人机翼展大,其能源系统也具有特殊结构.光伏电池铺装在飞机机身,对应地,机载能源系统通常采用分布式架构<sup>[7]</sup>.大规模分布式能源系统给能量调度带来了巨大挑战,传统控制框架下很难实现多能源系统的协同运行<sup>[8-9]</sup>.3)负载的多变性.太阳能无人机的负载多种多样,其对于电源质量的需求也不尽相同.尤其是用于调节飞行状况的电动机,在外界环境发生改变时,其电气特性也在快速地变化,对能源系统的能量供给提出了更高要求<sup>[10-11]</sup>.此外,还可能因为处理单元负担过重导致鲁棒性变差的情况<sup>[12]</sup>.因此提出一种轻量化、可靠性高的太阳能无人机能源系统控制方法尤为重要.

目前,能源系统的均衡问题已得到广泛重视.实现储能电池均衡的手段主要有主动均衡和被动均衡两种<sup>[13]</sup>.为提高能量利用率,通常采用主动均衡手段.文献[14]通过能量转移法实现均衡,将电压较高的电池中的能量通过电力电子装置向电压较低的电池充电.类似地,学者还提出了包括利用电感<sup>[15]</sup>或飞渡电容<sup>[16]</sup>进行能量转移的方案.文献[17]通过调节储能电池的荷电状态(state of charge, SOC)使得不同电池之间充电水平相同;文献[18-19]采用基于多智能体的方法研究储能均衡控制问题,有效提高了放电深度,提升了电池的利用率.然而,受到飞行器这一特殊应用场景的限制,上述成果难以直接应用.根据相关的文献调研,对于多个独立光伏发电单元且输出功率不均的问题尚未得到有效解决.

为满足飞行器对能源系统的需求,本文针对分布式能源系统进行研究.该能源系统由多个包含独立光伏发电、储能的发电单元构成,更好地适应了飞行器的分布式布局结构.本文重点关注能源系统的分布式结构带来的不同发电单元的协同控制问题,提出一种基于多智能体的能源系统分布式协同控制方法,解决由于光伏发电不均以及电池特性参数差异导致的储能单元充放电水平不同的问题,以提升整体的充放电深度,达到能源系统减重及提升系统比功率的目的.同时,控制器可对负荷功率进行有效跟踪,适应负荷的变化,满足飞行器对能源系统的需求.本文首先根据太阳能无人机能源系统的控制目标,考虑各个模块的储能电池SOC的变化特性,建立系统动力学模型,并进行闭环系统分析;随后,将控制器改进为以储

能电池输出电流为控制量的离散型控制器,并对控制量进行限幅以防止发电单元过载;最后,通过实验对所提出的控制方法进行验证.

## 1 分布式控制器设计

根据太阳能无人机能源系统分布式结构的特点,将能源系统的单个组成部分:光伏-储能-输出功率控制节点作为一个能量处理单元(energy processing unit, EPU)建立多智能体分布式控制模型,其架构如图1所示.

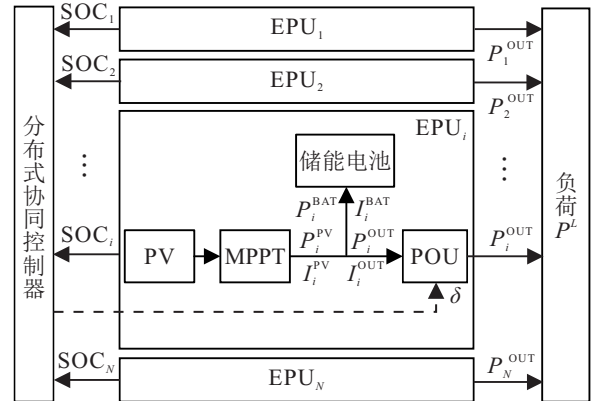


图1 控制模型架构

图1中:信号流以虚线表示,功率流以实线表示.注意到,储能单元既可以输出功率,也可以吸收功率,箭头方向为功率流正方向,即充电为正,放电为负.

对于单个EPU模块,从图1可以看出,电池充放电功率 $P^{BAT}$ 与光伏功率 $P^{PV}$ 、输出到负荷功率 $P^{OUT}$ 之间的关系为

$$P^{BAT} = P^{PV} - P^{OUT}. \quad (1)$$

本文考虑的能源系统含有多个EPU,每个EPU工作于电压源模式,向同一负荷供电.每个独立的EPU模块都由光伏(photovoltaic, PV)电池、MPPT、储能电池以及功率输出单元(power output unit, POU)控制器组成.本文将每个EPU输出功率占总输出功率的比例称为出力系数.分布式协同控制器处理每个EPU模块的运行参数,并向每一个EPU模块发布出力系数指令 $\delta$ ,实现各EPU模块储能电池均衡的目标.功率输出单元内置对出力系数的执行模块,对于并联的EPU,输出功率的调节采用下垂控制方法实现,对于串联的EPU,则通过调节电压比例实现.由于具体算法不是本文研究重点,不做赘述.

本文的控制目标是使所有EPU模块的电池SOC达到均衡.如果采用安时积分法计算电池SOC,则电池SOC与电流 $I$ 之间满足如下关系(这里假设充电倍率为1):

$$\text{SOC} = \text{SOC}_0 - \frac{1}{Q} \int_0^t I^{\text{BAT}}(\tau) d\tau.$$

因此,每个EPU模块的动力学模型为

$$\dot{x}_i = \frac{1}{V_i Q_i} (P_i^{\text{PV}} - \tau_i). \quad (2)$$

其中: $i = 1, 2, \dots, N$ 是EPU模块编号; $x_i$ 是第*i*个EPU模块电池的SOC值; $V_i$ 是储能电池的端电压; $Q_i$ 是电池容量; $P_i^{\text{PV}}$ 是光伏电池输出功率; $\tau_i$ 是负荷在第*i*个EPU模块上的实际消耗功率。

功率输出单元采用下垂控制方法,可根据出力系数自动调节输出功率大小,满足负荷功率要求,因此分布式协同控制算法只需提供适当的输出功率分配方案即可实现系统均衡.定义 $u_i$ 为第*i*个EPU模块计算的负荷输出功率,由于负荷随时间变化,引入比例系数 $\rho = \tau_i/u_i$ 表征控制器计算的输出功率与实际所需功率比例,从而将控制器与负荷大小解耦,以适应时变的负荷大小. $\rho$ 描述的是所需负荷与实际输出负荷之间的比例,故在能源系统所有EPU中保持唯一.模型(2)可改写为

$$\dot{x} = MP^{\text{PV}} - M\rho u. \quad (3)$$

其中: $x = [x_1, x_2, \dots, x_N]^T$ ;  $u = [u_1, u_2, \dots, u_N]^T$ ;  $M = \text{diag}\{m_1, m_2, \dots, m_N\}$ ,  $m_i = 1/(V_i Q_i)$ ;  $P^{\text{PV}} = [P_1^{\text{PV}}, P_2^{\text{PV}}, \dots, P_N^{\text{PV}}]^T$ . 根据对实际系统运行状态的估计可确定能源系统光伏和负荷功率变化量上界范围: $|\dot{P}^L| < d_1$ ,  $|\dot{P}_i^{\text{PV}}| < d_2$ ,  $P^L \in [P_{\min}^L, P_{\max}^L]$ , 其中 $P^L$ 为负荷所需的输入功率。

分布式协同控制器需要通过自身EPU模块与其他EPU模块的SOC差值作为调节误差进行反馈,从而对本模块输出的功率进行调整.为此,需引入通信网络进行数学描述.对于含有*N*个EPU的能源系统,利用图 $\mathcal{G}$ 描述EPU之间的通信关系.若第*i*个EPU模块可以接收第*j*个模块的信息,则令 $a_{ij} = 1$ ,此时称*j*为智能体*i*的邻居,否则 $a_{ij} = 0$ .定义 $a_{ii} = 0$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ ,并令 $\mathcal{N}_i$ 表示智能体*i*的所有邻居构成的集合.在本文研究的能源系统中,各EPU采用CAN总线进行通信.由CAN总线的工作原理可知,网络中的节点可以接收其他所有连接在CAN总线网络中的节点信息,因此本文在理论分析时将通讯拓扑建模为无向全连通图,即, $a_{ij} = 1, \forall i \neq j$ .在此基础上,定义拉普拉斯矩阵 $\mathcal{L} = [l_{ij}]$ 为

$$\begin{cases} l_{ij} = -a_{ij}, & i \neq j; \\ l_{ii} = \sum_{j=1}^N a_{ij}, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

## 1.1 基于连续系统模型的控制器设计

本文设计的分布式协同控制器形式如下:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{ci} &= \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (x_i - x_j) + k_2 \text{sign}(\rho - 1) + k_3 \times \\ &\sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} ((m_i P_i^{\text{PV}} - x_{ci}) - (m_j P_j^{\text{PV}} - x_{cj})), \\ u_i &= m_i^{-1} x_{ci} + k_1 m_i^{-1} \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (x_i - x_j). \end{aligned}$$

其中: $x_{ci}$ 是控制器内部状态,系统初始化时, $x_{ci}(0) = P_{\min}^L, \forall i \in \{1, 2, \dots, N\}$ ;  $k_1, k_2, k_3$ 是待设计的控制器增益.将上述控制器写为以下紧凑形式:

$$\begin{aligned} \dot{x}_c &= \mathcal{L}x + k_2 \text{sign}(\rho - 1) \mathbf{1}_N + k_3 \mathcal{L}(MP^{\text{PV}} - x_c), \\ u &= M^{-1}x_c + k_1 M^{-1} \mathcal{L}x. \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)为动态线性分布式控制器,控制器状态 $x_{ci}$ 由一致性误差 $\sum a_{ij}(x_i - x_j)$ 、输出功率误差 $(\rho - 1)\mathbf{1}_N = (P^L - \sum_{i=1}^N u_i) / \sum_{i=1}^N u_i$ 共同决定.当第*i*个EPU模块储能较其他模块更多时, $x_{ci}$ 增大进而 $u_i$ 增大,从而通过增加输出功率快速消耗储能.同时,其他SOC相对较小的模块输出到负荷的功率 $u_j$ 减小,以使各模块储能的SOC达成一致.另一方面, $x_{ci}$ 可根据光伏功率动态调节,表征光伏功率的差异性.对于光伏输入功率大的EPU模块,其控制器状态 $x_{ci}$ 也将增大,反之亦然.当各EPU输出功率达不到所需功率时, $\rho > 1$ ,进而 $x_{ci}$ 和 $u_i$ 增加,逐渐调节输出功率达到 $P^L$ .

## 1.2 闭环系统收敛性分析

对于第*i*个EPU模块,通过先验知识获取储能电池容量数据,根据理论分析结果设置控制器参数,再利用通讯获取网络上其他节点的状态 $x_j$ 和 $x_{cj}$ 以及 $\rho$ 的值,基于检测元件获得储能电池当前的电压值 $V_i$ .随后计算出当前时刻的 $x_{ci}$ 和 $u_i$ ,输出能源系统的控制参数至硬件电路.

考虑系统(3)及控制器(4).为表示方便,定义 $v = MP^{\text{PV}} - x_c$ .考虑到储能电池输出电压变化量不大,因此假设 $M = mI$ ,其中*m*为正实数.注意到系统计算出的功率输出与实际功率输出并不始终相等,因此首先验证在控制器(4)作用下, $\rho$ 在有限时间内收敛到1.

选取李雅普诺夫函数 $V_\rho = \frac{1}{2}(\rho - 1)^2$ .将 $V_\rho$ 对*t*求导可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_\rho &= (\rho - 1)\dot{\rho} = \\ &(\rho - 1) \frac{\dot{P}^L \mathbf{1}_N^T x_c - P^L \mathbf{1}_N^T \dot{x}_c}{(\mathbf{1}_N^T x_c)^2} = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& (\rho - 1) \frac{\dot{P}^L}{1_N^T x_c} - (\rho - 1) \frac{P^L 1_N^T}{(1_N^T x_c)^2} (\mathcal{L}x + \\
& k_2 \text{sign}(\rho - 1) 1_N + k_3 \mathcal{L}(MP^{\text{PV}} - x_c)) = \\
& (\rho - 1) \left( \frac{\rho \dot{P}^L}{P^L} - k_2 N \frac{\rho^2}{P^L} \text{sign}(\rho - 1) \right) \leq \\
& |\rho - 1| \left( \frac{|\rho| \dot{P}^L}{P^L} - k_2 N \frac{\rho^2}{P^L} \right) \leq \\
& \frac{|\rho - 1|}{P^L} (d_1 |\rho| - k_2 N \rho^2).
\end{aligned}$$

根据最后一个式子可看出在平衡点  $\rho = 1$  之外,  $\dot{V}_\rho$  有两处为零, 即  $\rho = 0$  和  $|\rho| = \frac{d_1}{k_2 N}$ . 若  $k_2 > d_1$ , 则  $\frac{d_1}{k_2 N} < \frac{1}{N}$ , 又由  $x_{ci} = P_{\min}^L$  可知  $\rho(0) > \frac{1}{N}$ , 故  $\rho(0) > \frac{d_1}{k_2 N}$ . 因此,  $\dot{V}_\rho < 0, \forall t > 0, \rho$  渐近收敛到 1. 不妨取  $k_2 = d_1 + \varepsilon_1$ , 其中  $\varepsilon_1 > 0$  是任意指定的常数, 有

$$\begin{aligned}
\dot{V}_\rho & \leq \frac{|\rho - 1|}{P_{\max}^L} (d_1 |\rho| - N(d_1 + \varepsilon_1) \rho^2) \leq \\
& \frac{|\rho - 1|}{P_{\max}^L} \left( d_1 \frac{1}{N} - N(d_1 + \varepsilon_1) \frac{1}{N^2} \right) = \frac{\varepsilon_1 |\rho - 1|}{N P_{\max}^L}.
\end{aligned}$$

令  $c = \frac{\sqrt{2}\varepsilon_1}{N P_{\max}^L}$ , 则  $\dot{V}_\rho \leq -c V_\rho^{\frac{1}{2}}$ . 因此,  $\rho$  在有限时间收敛至 1, 且收敛时间不超过  $T_1 = \frac{2}{c} V_\rho^{\frac{1}{2}}(0)$ . 从收敛时间可知,  $\varepsilon_1$  越大, 即  $k_2$  越大,  $T_1$  越小, 收敛速度越快. 因此可以通过适当调节  $k_2$  获得合适的收敛速度. 在对  $V_\rho$  的分析过程中可以看出, 其取值和收敛特性与  $x$  和  $v$  无关. 当  $t > T_1$  时,  $\rho = 1$ . 为此探究系统状态  $x$  和  $v$  的演化特性.

考虑李雅普诺夫函数  $V = \frac{1}{2} x^T \mathcal{L} M \mathcal{L} x + \frac{1}{2} v^T \mathcal{L} v$ , 于是有

$$\begin{aligned}
\dot{V} & = x^T \mathcal{L} M \mathcal{L} \dot{x} + v^T \mathcal{L} \dot{v} = \\
& x^T \mathcal{L} M \mathcal{L} v - k_1 x^T \mathcal{L} M \mathcal{L} M \mathcal{L} x + \\
& v^T \mathcal{L} (M \dot{P}^{\text{PV}} - M \mathcal{L} x - k_3 M \mathcal{L} v) = \\
& -k_1 m^2 x^T \mathcal{L} \mathcal{L} \mathcal{L} x + v^T \mathcal{L} M \dot{P}^{\text{PV}} - k_3 v^T \mathcal{L} M \mathcal{L} v.
\end{aligned}$$

其中:  $\dot{P}^{\text{PV}}$  是光伏发电功率的变化率, 注意到  $P^{\text{PV}} = P_1 + P_2$  且  $P_1 = p 1_N, p \in R$ . 另外, 根据  $1_N^T \mathcal{L} = 0$  的性质有  $v^T \mathcal{L} M \dot{P}^{\text{PV}} = m v^T \mathcal{L} \dot{P}_2$ . 对于任意的  $\varepsilon_2 > 0$  有

$$v^T \mathcal{L} \dot{P}_2 = 2x^T \frac{\mathcal{L} \dot{P}_2}{2} \leq \frac{1}{\varepsilon_2} v^T \mathcal{L} \mathcal{L} v + m^2 \frac{\varepsilon_2}{4} \dot{P}_2^T \dot{P}_2.$$

于是

$$\dot{V} \leq -k_1 m^2 x^T \mathcal{L} \mathcal{L} \mathcal{L} x - \left( k_3 - \frac{1}{\varepsilon_2} \right) v^T \mathcal{L} \mathcal{L} v + m^2 P_w,$$

其中  $P_w = \frac{\varepsilon_2}{4} \dot{P}_2^T \dot{P}_2$ . 同时注意到, 对于任意  $\theta \in R^n$ ,  $\theta^T \mathcal{L} \theta \geq 0$ , 仅当  $\theta$  与  $1_N$  向量平行时等号成立. 因此, 取  $k_3 > \frac{1}{\varepsilon_2}$ , 则  $-k_1 m^2 x^T \mathcal{L} \mathcal{L} \mathcal{L} x - \left( k_3 - \frac{1}{\varepsilon_2} \right) v^T \mathcal{L} \mathcal{L} v \leq 0$ .

若  $P_w \equiv 0$ , 则  $\dot{V} \equiv 0$  当且仅当  $\mathcal{L}v = 0$  且  $\mathcal{L}x = 1_N \theta$ , 于是有  $0 = 1_N^T \mathcal{L}x = 1_N^T 1_N \theta = N\theta$ , 可以得出  $\theta = 0$ , 即  $\mathcal{L}x = 0$ .  $x$  和  $v$  将逐渐趋于一致, 即对于任意  $i, j \in 1, 2, \dots, N$ , 有

$$x_i = x_j, m_i P_i^{\text{PV}} - m_i x_{ci} = m_j P_j^{\text{PV}} - m_j x_{cj}.$$

对于  $P_w \neq 0$  的情况, 系统状态不能完全收敛至原点, 而会保持一致性流形的邻域内.

从以上分析中可以看出, 虽然系统不会完全收敛到一致性流形, 但可以看出  $P_w$  反映了光伏功率的变化情况, 当光伏发电功率稳定不变时, 第一项为  $P_w = 0$ , 系统可完全达成一致. 此外, 可以通过适当调节控制器参数减小最终不变集的大小, 即增大  $k_1$  以降低系统的不均衡性.

**注1** 从式(3)中可以看出, 负荷大小并未在动力学模型中出现, 因此负荷的波动并非以扰动量的形式加入到动力学模型中. 事实上, 在控制器(4)中的  $\text{sign}(\rho - 1)$  项使得控制算法可以在负荷发生改变时及时做出响应. 因此, 本文提出的控制算法可以处理负荷波动的影响. 另一方面, 当光伏功率不同时, 控制器(4)中  $\mathcal{L}(MP^{\text{PV}} - x_c)$  项实现了对光伏发电功率的跟踪, 使得高光伏输入 EPU 的输出功率也相应较大, 最终  $m_i P_i^{\text{PV}} - x_{ci}$  彼此趋同, 即充电功率相同, 从而实现储能均衡. 因此, 本文提出的控制算法可以处理光伏处理不均的影响.

## 2 基于离散模型的分布式协同控制器设计

基于连续系统模型的控制器的初步实现了能源系统各智能体之间相互协同, 储能电池均衡放电, 但是均衡效果并不理想. 通过具体分析可知, 以功率作为控制量时, SOC 较高的储能单元通过控制算法求得的控制量虽然对应着较高的出力系数, 理论上该模块功率输出应较大, 但是由于其电压较高, 折算到储能单元的供电电流并没有太大的变化. 同样地, 由于 SOC 较低的储能单元, 其电池电压相对较低, 因而通过功率进行调节的控制算法求得的控制量虽然降低了该模块的输出功率, 但折算到电池输出电流的量纲上时, 该通道的输出电流仍然保持着一个相对较大的数值. 因此该通道的放电速度并没有减慢, 从而导致各个智能体的一致性调节并不明显. 综上所述, 以功率为调节量难以做到对荷电状态的精确控制, 尤其是对于电池特性参数存在差异的情况. 考虑到直接改变荷电状态的物理量是电流, 因此, 只有通过限制各个智能体的电池电流, 改变其放电速度, 才能保证 EPU 的均衡性. 另一方面, 在实际应用中均采用计算机控制系统部署控制算法, 系统本质上是离散的, 因

此研究离散系统模型更具实际意义. 针对上述问题, 本节首先建立以电流为控制量的离散模型, 进而设计新的分布式协同控制器, 提升系统控制能力, 最后, 通过对物理幅值进行限幅防止系统出现过载.

## 2.1 基于离散模型的控制设计

将系统模型(2)离散化为

$$x_i(k+1) = x_i(k) + T \left( \frac{P_i^{\text{PV}}}{Q_i V_i} - \frac{u_i}{Q_i} \right). \quad (5)$$

其中:  $T$  为采样周期, 其他物理量定义与模型(2)相同.

定义  $\Theta = \text{diag} \left( \frac{1}{Q_1}, \frac{1}{Q_2}, \dots, \frac{1}{Q_N} \right)$  以及  $I^{\text{PV}} = \left[ \frac{P_1^{\text{PV}}}{V_1}, \frac{P_2^{\text{PV}}}{V_2}, \dots, \frac{P_N^{\text{PV}}}{V_N} \right]$ ,  $\frac{P_i^{\text{PV}}}{V_i}$  是第  $i$  个 EPU 模块中折算到储能侧的光伏输入电流. 则模型(5)可以表示为向量形式

$$x(k+1) = x(k) + T\Theta(I^{\text{PV}} - u). \quad (6)$$

由于 SOC 由电池充放电电流决定, 这里对电池电流进行分析. 选取单通道输出电流  $I_i^{\text{OUT}}$  为控制量. 由于光伏与储能电池之间的 DC/DC 电路以及储能电池到输出侧的 DC/DC 电路均不影响功率关系(1), 可以得到第  $i$  个 EPU 模块电池电流、光伏电流以及输出电流之间的关系

$$I_i^{\text{BAT}} = \frac{P_i^{\text{PV}}}{V_i} - I_i^{\text{OUT}}.$$

将上式两边同除以电池容量  $Q_i$  即可得到离散数学模型右侧的控制作用为  $\frac{P_i^{\text{PV}}}{Q_i V_i} - \frac{u_i}{Q_i}$ . 以此模型为基础, 对原控制器进行改进, 得到改进离散控制算法为

$$x_c = I^{\text{PV}} + 1_N I^{\text{BAT}}, \quad (7)$$

$$I^{\text{BAT}} = \frac{\left( P^L - \sum_{i=1}^N P_i^{\text{PV}} \right)}{\sum_{i=1}^N V_i}, \quad (8)$$

$$u = x_c + K\mathcal{L}x. \quad (9)$$

其中:  $x_c = [x_{c1}, x_{c2}, \dots, x_{cN}]^T$  是控制器内部状态, 表示 EPU 模块向负荷输出的电流;  $u = [u_1, u_2, \dots, u_N]^T$  是控制器输入量, 表示各个 EPU 模块的储能电池输入/输出电流(充放电电流);  $K$  是控制器参数. 以此为基础, 通过各通道的输出电流之间的关系, 折算到系统的出力系数, 再进行控制指令的下发.

## 2.2 闭环系统收敛性分析

将闭环系统写为紧凑形式

$$x(k+1) = x(k) + T\Theta(-1_N I^{\text{BAT}}(k) - K\mathcal{L}x(k)) = (E - T\Theta K\mathcal{L})x(k) - T\Theta 1_N I^{\text{BAT}}(k),$$

其中  $E$  是单位矩阵.

由于采用相同的锂电池作为储能电池, 并且储能电池组中电池个数相同, 可认为储能电池组容量近似相等, 即  $Q_1 = Q_2 = \dots = Q_N \triangleq Q$ . 令  $W = E - Q^{-1}TK\mathcal{L}$ ,  $c(k) = TQ^{-1}I^{\text{BAT}}(k) \in \mathbf{R}$ . 可以将上式进一步写为

$$x(k+1) = Wx(k) - c(k)1_N. \quad (10)$$

分析可得  $W1_N = 1_N$ , 即  $W$  是行随机矩阵. 将式(10)进行迭代可以得到

$$x(k+1) = W^{k+1}x(0) - \sum_{j=0}^k c(j)1_N. \quad (11)$$

根据随机矩阵理论可知  $\lim_{k \rightarrow \infty} W^k x(0) = v(\omega^T x(0))$ , 其中  $Wv = v$ ,  $\omega^T W = \omega^T$ ,  $v$  和  $\omega$  分别是行随机矩阵  $W$  的 1 特征值对应的右和左特征向量, 且  $v^T \omega = 1$ . 因此  $W^{k+1}x(0)$  将收敛到一个与初始 SOC 有关的值. 通过式(11)可以看出, 所有 EPU 模块的储能电池 SOC 仅由初始 SOC 以及在一段时间内的充放电电流共同决定, 各储能模块的 SOC 最终将趋于均衡, 其增减由充放电电流, 即光伏和负荷的状态决定.

## 2.3 算法实现

在实际应用中, 可按算法 1 实现能源系统的分布式控制.

**算法 1** 分布式控制算法.

step 1: 从通信网络获取其他节点状态;

step 2: 根据式(7)~(9)计算控制量  $u_i$ ;

step 3: 计算本节点的输出功率  $P_i^{\text{OUT}} = u_i V_i$ ;

step 4: 对输出功率  $P_i^{\text{OUT}}$  进行限幅, 防止过载;

step 5: 根据负荷功率计算本节点的出力系数.

## 3 半实物实验验证

本文采用 2 kW 级能源系统演示样机进行实验, 基于现有的 MPPT 和 DC/DC 电路板搭建半实物仿真平台, 并在此基础上增加分布式控制单元, 通过构建 CAN 总线网络实现节点间的信息交互.

### 3.1 能源系统实验平台

基于现有的 MPPT 和 DC/DC 电路植入分布式控制器以实现太阳能无人机的能源系统的储能管理. 分布式控制器以 STM32 嵌入式处理器为处理核心, 每个控制器包含 1 个 CAN 总线接口, 用于进行控制器间以及控制器与上位机间的数据交互. 系统包含 6 个 EPU, 每个 EPU 工作于电压源模式, 3 个 EPU 串联, 采用图 2 所示的电路连接. 两组 EPU 并联向负荷供电. 功率输出单元内置对出力系数的执行模块, 对于并联的 EPU, 输出功率的调节采用下垂控制方法实现, 对于串联的 EPU, 则通过调节电压比例实现.

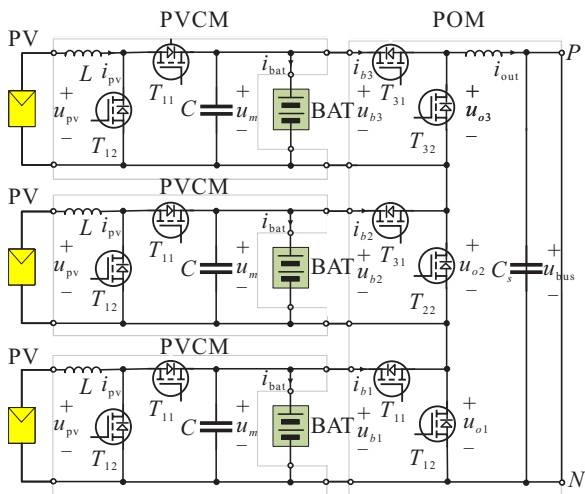


图2 电路原理图

实验平台各部分电气参数如表1所示。

表1 电气参数

参数名称	参数大小
总负荷/W	900
EPU个数	6
储能电池型号	18650
储能电池电压范围/V	3.0~4.3
储能电池平台电压/V	3.7
电池组串长度	36
电池组串平台电压/V	135
电池组串个数	6
母线电压/V	135
无负荷时光伏最大输出功率/W	135
无光伏产生功率时最大输出功率/W	135
恒功率负荷/W	250

根据以上原理和需求,搭建半实物平台进行实验. 实验平台实物如图3所示. 两组实验平台并联向负荷供电.

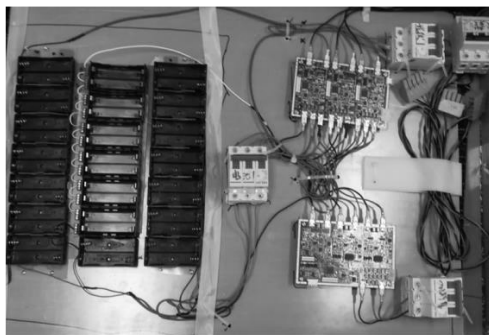


图3 设备实物

### 3.2 实验结果与分析

基于上述平台进行半实物仿真实验,使用光伏模拟器代替实际光伏,使用电子负载的恒功率模式模拟实际负载. 设置光照充足工况,且嵌入式控制器的控制周期为  $T = 5s$ ,实验中光伏参数及实验前后SOC如表2所示. SOC变化曲线如图4所示.

表2 实验参数设置

	光伏参数	SOC初始值	实验后SOC值
EPU <sub>1</sub>	30V 3A	0.449	0.629
EPU <sub>2</sub>	30V 2A	0.509	0.632
EPU <sub>3</sub>	30V 3A	0.356	0.632
EPU <sub>4</sub>	30V 3A	0.389	0.635
EPU <sub>5</sub>	30V 3A	0.480	0.628
EPU <sub>6</sub>	30V 3A	0.580	0.633

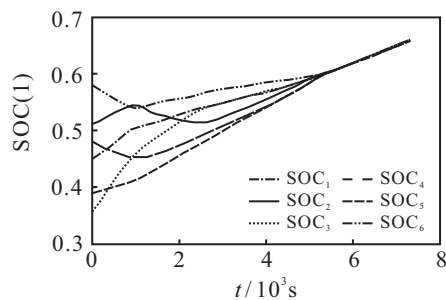


图4 SOC随时间变化曲线

从实验结果可以看出,在初始SOC有较大差异的情况下,系统各通道SOC经过协同控制算法在6000s左右收敛一致,并保持均衡性继续充电,截止到实验结束时,最大SOC与最小SOC相差0.0054. 实验参数的配置考虑了光伏差异性对均衡性的干扰,从而验证了算法对光伏差异的鲁棒性.

**注2** 本文考虑的对均衡性产生不利影响的扰动主要是光伏输入功率的差异性,即不同EPU的光伏输入功率不同,导致储能系统充放电功率不同,进而产生SOC差异,影响充放电深度. 在实验中,光伏输入功率设置为不同的数值,以此表现这种差异性. 在理论分析中,控制器内部状态  $x_{ci}$  实现了对光伏差异性的体现,高光伏输入节点的  $x_{ci}$  更大,因此输出功率也更大,从而消除光伏差异性对均衡性的影响. 在实验中会出现电压、电流测量信号噪声,该噪声可通过传感器侧的卡尔曼滤波器消除,根据确定性等价原理,该噪声影响并未在控制器设计和分析中考虑.

### 4 结论

本文采用基于多智能体的分布式协同控制方法对太阳能无人机能源系统进行了理论分析和实验验证. 采用基于离散模型的分布式协同控制方法能够有效实现储能电池均衡工作,提升能源系统的能量利用率. 后续将通过环境适应性实验和可靠性实验,将上述方法用于太阳能无人机能源系统实际控制中.

### 参考文献(References)

[1] 朱立宏, 孙国瑞, 呼文韬, 等. 太阳能无人机能源系统的关键技术与发展趋势[J]. 航空学报, 2020, 41(3): 623503.  
(Zhu L H, Sun G R, Hu W T, et al. Key technology

- and development trend of energy system in solar powered unmanned aerial vehicles[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(3): 623503.)
- [2] Wu M J, Shi Z W, Xiao T H, et al. Energy optimization and investigation for Z-shaped sun-tracking morphing-wing solar-powered UAV[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2019, 91: 1-11.
- [3] 郭安,周洲,祝小平,等. 基于EKF算法的太阳能无人机低成本飞控状态估计[J]. *控制与决策*, 2020, 35(10): 2415-2423.  
(Guo A, Zhou Z, Zhu X P, et al. State estimation of low-cost flight controller of solar-powered UAV based on EKF algorithms[J]. *Control and Decision*, 2020, 35(10): 2415-2423.)
- [4] Zhang C Y, Zhang C M, Li L Y, et al. Parameter analysis of power system for solar-powered unmanned aerial vehicle[J]. *Applied Energy*, 2021, 295: 117031.
- [5] Lee Y S, Cheng M W. Intelligent control battery equalization for series connected lithium-ion battery strings[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2005, 52(5): 1297-1307.
- [6] 艾洪克, 吴俊勇, 郝亮亮, 等. 级联式储能系统中电池自均衡控制策略研究[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(14): 442-449.  
(Ai H K, Wu J Y, Hao L L, et al. Research on battery self-balancing control strategy in cascade energy storage system[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(14): 442-449.)
- [7] Zhang J, Lou M H, Xiang L, et al. Power cognition: Enabling intelligent energy harvesting and resource allocation for solar-powered UAVs[J]. *Future Generation Computer Systems*, 2020, 110: 658-664.
- [8] 陈龙, 韩中洋, 赵琨, 等. 数据驱动的综合能源系统运行优化方法研究综述[J]. *控制与决策*, 2021, 36(2): 283-294.  
(Chen L, Han Z Y, Zhao J, et al. Review of research of data-driven methods on operational optimization of integrated energy systems[J]. *Control and Decision*, 2021, 36(2): 283-294.)
- [9] Kumar Nunna H S V S, Doolla S. Multiagent-based distributed-energy-resource management for intelligent microgrids[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(4): 1678-1687.
- [10] Boukoberine M N, Zhou Z B, Benbouzid M. A critical review on unmanned aerial vehicles power supply and energy management: Solutions, strategies, and prospects[J]. *Applied Energy*, 2019, 255: 113823.
- [11] Galassini A, Costabeber A, Gerada C, et al. Distributed speed control for multi-three phase electrical motors with improved power sharing capability[C]. 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Cincinnati, 2017: 2492-2497.
- [12] Lei T, Yang Z, Lin Z C, et al. State of art on energy management strategy for hybrid-powered unmanned aerial vehicle[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2019, 32(6): 1488-1503.
- [13] Han W J, Zhang L, Han Y H. Computationally efficient methods for state of charge approximation and performance measure calculation in series-connected battery equalization systems[J]. *Journal of Power Sources*, 2015, 286: 145-158.
- [14] Kutkut N H, Divan D M, Novotny D W. Charge equalization for series connected battery strings[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1995, 31(3): 562-568.
- [15] Park H S, Kim C H, Park K B, et al. Design of a charge equalizer based on battery modularization[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2009, 58(7): 3216-3223.
- [16] 李海冬, 齐智平, 冯之钺. 超级电容器电力储能系统的电压均衡策略[J]. *电网技术*, 2007, 31(3): 19-23.  
(Li H D, Qi Z P, Feng Z Y. Voltage balancing strategy for supercapacitor power storage system[J]. *Power System Technology*, 2007, 31(3): 19-23.)
- [17] 吴友宇, 梁红. 电动汽车动力电池均衡方法研究[J]. *汽车工程*, 2004, 26(4): 382-385.  
(Wu Y Y, Liang H. A study on equalization charging for EV traction battery[J]. *Automotive Engineering*, 2004, 26(4): 382-385.)
- [18] Morstyn T, Savkin A V, Hredzak B, et al. Multi-agent sliding mode control for state of charge balancing between battery energy storage systems distributed in a DC microgrid[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(5): 4735-4743.
- [19] Xu Y L, Li Z C, Zhao J H, et al. Distributed robust control strategy of grid-connected inverters for energy storage systems' state-of-charge balancing[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(6): 5907-5917.

## 作者简介

吕冬翔(1987—), 男, 高级工程师, 博士, 从事飞行器能源系统的分布式控制、飞行器能源管理等研究, E-mail: dongxianglv@163.com;

张志成(1990—), 男, 助理研究员, 博士, 从事饱和多智能体系统分布式协同控制的研究, E-mail: zczhang@tju.edu.cn;

朱立宏(1968—), 男, 教授级高级工程师, 从事先进能源技术、能源管理系统智能调度策略等研究, E-mail: zhulihong@18cetc.com;

李鹏(1993—), 男, 博士生, 从事Delta算子系统和有限频率分析的研究, E-mail: lipeng\_2017@163.com;

呼文韬(1984—), 男, 高级工程师, 硕士, 从事飞行器能源动力系统的研究, E-mail: hu\_hu605@163.com;

李钊(1974—), 男, 高级工程师, 硕士, 从事临近空间无人机能源系统总体设计的研究, E-mail: lichuan@cetc18.com;

左志强(1973—), 男, 教授, 博士生导师, 从事非线性系统及鲁棒 $H_\infty$ 控制、多智能体系统、分布式控制等研究, E-mail: zqzuo@tju.edu.cn.

(责任编辑: 闫妍)