



中国科技期刊卓越行动计划项目入选期刊

控制与决策

CONTROL AND DECISION

临近空间太阳能飞行器能源系统控制综述

张志成, 李鹏, 左志强, 王一晶, 呼文韬, 倪旺, 刘兴江

引用本文:

张志成, 李鹏, 左志强, 王一晶, 呼文韬, 倪旺, 刘兴江. 临近空间太阳能飞行器能源系统控制综述[J]. 控制与决策, 2024, 39(6): 1761–1777.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2023.1539>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于双层规划的高超声速飞行器预警资源分配方法

Early warning resource allocation method for hypersonic vehicle based on bi-level programming

控制与决策. 2021, 36(2): 443–449 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0717>

数据驱动的综合能源系统运行优化方法研究综述

Review of research of data-driven methods on operational optimization of integrated energy systems

控制与决策. 2021, 36(2): 283–294 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0725>

高超声速飞行器间歇故障改进自适应容错控制

Improved adaptive fault-tolerant control of intermittent faults in hypersonic flight vehicle

控制与决策. 2021, 36(11): 2627–2636 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0483>

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

Distributed finite-time secondary control for heterogeneous battery energy storage systems in an islanded microgrid

控制与决策. 2021, 36(8): 2034–2041 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0012>

考虑气动效应不确定性的气动辅助变轨制导算法

Aeroassisted orbital transfer robust guidance method considering atmosphere effect uncertainty

控制与决策. 2020, 35(11): 2773–2779 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0333>

临近空间太阳能飞行器能源系统控制综述

张志成^{1,3}, 李鹏^{1,3}, 左志强^{1,3}, 王一晶^{1,3}, 呼文韬², 倪旺², 刘兴江^{2†}

(1. 天津大学 电气自动化与信息工程学院, 天津 300072; 2. 中国电子科技集团公司第十八研究所, 天津 300384; 3. 天津市智能无人集群技术与系统重点实验室, 天津 300072)

摘要: 临近空间太阳能飞行器是由太阳能驱动、可在临近空间连续飞行的长航时无人飞行器,近年来其相关研究已成为各国关注的焦点。能源系统是支撑太阳能飞行器长时驻空的关键,实现连续跨昼夜的不间断能量供给是能源系统领域研究的首要目标。围绕临近空间太阳能飞行器集群化能源系统发展过程中的主要问题和研究现状,首先梳理飞行器应用场景下能源系统的控制目标与多重约束,进而系统论述集群化能源系统结构、功能及建模方法;然后,总结集群化能源系统功率分配、储能均衡以及通信受限下能流控制的发展现状,阐述基于强化学习的能量在线调度策略的最新成果,分析现有策略的有效性及其不足之处;最后,结合太阳能飞行器的实际需求,探讨能源系统的未来发展趋势与研究方向。

关键词: 集群化能源系统; 临近空间太阳能飞行器; 目标与约束; 分布式控制; 储能均衡; 能量调度

中图分类号: TP273 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2023.1539

引用格式: 张志成,李鹏,左志强,等. 临近空间太阳能飞行器能源系统控制综述[J]. 控制与决策, 2024, 39(6): 1761-1777.

A survey of energy system control for near-space solar-powered aerial vehicles

ZHANG Zhi-cheng^{1,3}, LI Peng^{1,3}, ZUO Zhi-qiang^{1,3}, WANG Yi-jing^{1,3}, HU Wen-tao², NI Wang², LIU Xing-jiang^{2†}

(1. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Tianjin Institute of Power Sources, Tianjin 300384, China; 3. Tianjin Key Laboratory of Intelligent Unmanned Swarm Technology and System, Tianjin 300072, China)

Abstract: The near-space solar-powered aerial vehicle is a long-endurance aircraft that uses solar energy as the source and is capable of continuous flight in near space. In recent years, the investigation of solar-powered aerial vehicles has become the focus of attention for many countries. The energy system is key in supporting the long-term operation of solar-powered aircraft, and achieving uninterrupted energy supply across the day and night is the primary objective in the research field of energy systems. Focusing on the main issues and research status in the development of clustered energy systems of near-space vehicles, the control objectives and multiple constraints of the energy system in the application scenario of the aircraft are sorted out first. Then the structure, function and modeling approaches of the clustered energy system are systematically discussed. Second, the state-of-the-art power-sharing, energy storage balance, and energy flow control under communication constraints in the clustered energy systems are summarized. And the achievements of reinforcement learning-based online energy scheduling are stated. The effectiveness and shortcomings of existing strategies are further analyzed. Finally, the future trend and research direction of energy systems are discussed by considering the practical requirement for solar-powered aircraft.

Keywords: clustered energy system; near-space solar-powered aerial vehicle; objectives and constraints; distributed control; energy storage balance; energy scheduling

0 引言

海拔 20~100 km 的空域称为临近空间,介于传统航空器最高飞行高度与卫星最低轨道高度之间^[1],

具有极高的军事和民用价值,现已成为大国博弈的战略新兴领域^[2].

临近空间太阳能飞行器是太阳能驱动的,可在

收稿日期: 2023-11-04; 录用日期: 2024-03-01.

基金项目: 国家自然科学基金项目(62173243,61933014); 国防科技重点实验室基金项目(2022-JCJQ-LB-054-05).

†通讯作者. E-mail: xjliu@nklps.org.

临近空间飞行的高空长航时 (high altitude and long endurance, HALE) 无人驾驶飞行器 (unmanned aerial vehicle, UAV). 与传统飞行器和卫星相比, 其飞行高度高, 覆盖范围广, 使用成本低, 可在临近空间长期驻留^[3]. 临近空间太阳能飞行器的部署和应用有效填补了航空器与航天器间的空白区域, 是临近空间应用的重要手段^[4], 为网络覆盖与通信中继^[5]、资源勘探与灾害预警^[6]、凝视侦察与防空预警^[7-8]等领域带来颠覆性发展. 临近空间太阳能飞行器的发展与应用已成为当前以及未来很长一段时间的前沿热点.

随着临近空间太阳能飞行器的战略意义和应用价值逐渐为人熟知, 相关研究受到极大重视. 世界各国持续开展太阳能飞行器研究, 先后研制出几十种型号的太阳能飞行器, 高空运行频次不断提升, 呈现常态化趋势. 表1列出了一些典型的临近空间太阳能飞行器型号. 美国空军推进的“战斗天星”计划探索基于临近空间浮空气球、飞行器组合的通信与监视系统. Google X实验室的Loon项目利用太阳能超压气球在平流层组建无线网络, 为偏远地区提供移动通信服务^[9-11]. 2022年Zephyr S太阳能飞行器(如图1所示)完成了64个连续昼夜的平流层飞行, 创造了人类历史上最长的连续飞行记录^[12]. 同年, 我国自主研发的“彩虹”太阳能飞行器(如图2所示)完成了临近空间20 km高度连续7天跨昼夜飞行, 标志着我国临近空间探索与应用技术已跻身世界前列.

表1 国外典型太阳能飞行器性能指标

名称	翼展/m	飞行高度/km	驻空时间/h	有效载荷/kg
PathFinder	29.5	21.8	14.5	45
PathFinder+	36.3	24.4	—	67.5
Centurion	61.8	30.5	—	270
Helios (HP01)	75.3	29.5	18	329
Helios (HP03)	75.3	19.8	—	100
Aquila	43	27.4	—	—
PHASA-35	35	21	—	—
Zephyr 7	22.5	21.5	336	2.5
Zephyr 8	28	23.2	624	5



图1 Zephyr S太阳能飞行器



图2 “彩虹”太阳能飞行器

我国高度重视临近空间的应用价值和战略地位, 作为国家“十三五”“十四五”规划的重要组成部分, 积极布局和开展新一代无人平台的相关研究. 然而, 我国太阳能飞行器能源系统的研究相对较晚, 与国际先进水平相比, 在驻空时间、有效载荷等方面还存在差距. 能源系统的能量管控能力和能量利用率不足已成为制约我国太阳能飞行器快速发展的瓶颈问题.

飞行器能源系统本质上是一种孤岛模式运行的微电网, 与地面能源系统相比, 其工作环境更为复杂, 控制目标和约束更为多样. 控制目标方面, 昼夜能量平衡是临近空间飞行器长时驻空飞行的基本保障^[13], 也是区别于地面能源系统的主要特征. 能量不平衡意味着飞行器夜间将失去动力, 导致任务失败甚至发生坠毁. 因此在能源系统的容量设计、能流控制等各阶段均需将能量平衡作为首要目标. 控制约束方面, 由于飞行器载重限制, 飞行器能源系统的容量、变换器数量和种类以及电力传输线和信号传输线用量等各方面均受到严格约束, 控制策略的应用条件较地面能源系统更加苛刻, 制约了能流控制与能量调度的手段^[14]. 此外, 由于临近空间飞行器任务多样, 运行工况复杂多变, 能源系统运行于多物理场高度耦合、时空关联性与不确定性强、多种约束共存的复杂环境中, 难以对发电、用电设备进行精细建模, 传统地面直流微网的研究成果无法直接应用, 亟需针对飞行器应用环境开展能量管理系统研究.

在此背景下, 如何延长临近空间太阳能飞行器的驻空时间成为飞行器研究的核心问题, 吸引了众多学者的兴趣, 并从光储器件创新、气动综合设计、姿态/航迹优化等角度总结了现有研究成果. 在太阳能飞行器的能量获取和储存方面, 现有工作聚焦新材料、新工艺的创新, 致力于提升光伏发电量和储能单元比能量, 实现能量的“开源”, 主要涉及太阳能电池和储能电池的种类、作用及关键参数^[15-17], 同时指出无线传能技术是未来能量供给的可行方向^[18]. 在翼型设计与空气动力学分析方面, 通过气动综合设计来提高升阻比并降低飞行动能损耗, 从而实现能量的

“节流”,文献结合低雷诺数空气动力特性综述了翼型优化方法^[13,19]。此外,还有研究聚焦低刚度机体的主动控制方法^[13,20]。在航迹优化方面,现有研究利用风梯度滑翔^[21-22]、飞行航向和姿态优化^[23-24]以及电化学/重力势能联合储能优化^[25-27]等方法实现能量的“节流”。

值得注意的是,光储单元性能提升的成本是一个不容忽视的因素,同时太阳能飞行器的低载重和低机动性也制约了航迹跟踪精度。目前,通过能源系统的优化设计来更好地利用获取的能源,降低能流损耗,提升飞行器能源系统供电能力,是增加飞行器驻空时间的有效途径。作为支撑太阳能飞行器长时驻空的关键环节,能源系统对能量的有效管理已成为飞行器发展所面临的严峻考验。能量管理的主要功能是实现太阳电池阵输出功率调节,储能电池组充放电管理,以及协调多个分布式发电单元的运行,为机载动力系统和有效载荷提供稳定、充足的能量供给。能源系统的能流控制性能和能量调度水平直接决定了临近空间飞行器的飞行高度、续航时间和有效载重。

目前,针对临近空间太阳能飞行器能源系统建模、能流控制和能量调度策略的总结尚不充分。为此,本文综述集群化能源系统控制研究的发展现状、主要方法及最新成果,分析能源系统能流控制与能量调度所面临的问题与挑战,并对未来发展趋势及研究方向进行展望。

1 太阳能飞行器集群化能源系统

临近空间太阳能飞行器的长时驻空能力来源于可再生能源的有效获取与利用。飞行器机身铺装光伏电池进行太阳能发电,维持动力系统、航空电子设备和有效载荷的运行,并采用锂离子电池等二次电池存储剩余的电能供夜间使用。太阳能飞行器能量流动如图3所示。飞行器超长航时中对能量供给的迫切需求给能源管理系统带来极大挑战。通过合理设计光

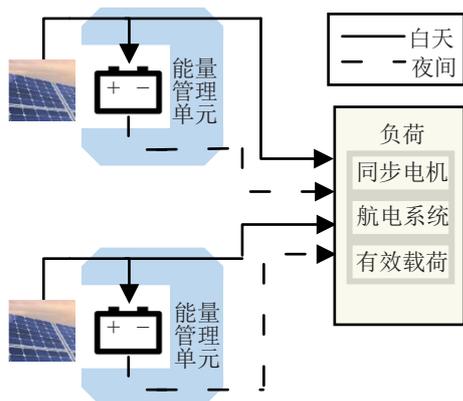


图3 太阳能飞行器能流示意图

伏电池和储能电池的容量以及可靠高效的能量调度策略,可以保障昼夜不间断的能量供给,从而实现太阳能飞行器长达数月的连续飞行。

本文首先分析太阳能飞行器能源系统的控制目标和控制约束,进而给出集群化能源系统结构及建模方法。

1.1 能源系统的控制目标与约束

飞行器能源系统的能流控制与能量调度需要兼顾能量平衡、功率平衡、储能均衡以及能流高效4个基本要求:

1) 能量平衡^[13]指白天储能电池存储的能量能够满足夜间能量需求,从而实现跨昼夜飞行;

2) 功率平衡^[28]要求发电功率满足负荷所需,对于直流能源系统而言,功率平衡意味着母线电压保持在容许范围内;

3) 储能均衡^[28]旨在通过提高可控储能单元(电池或电池组串)储电量的一致性来提升其放电深度,进而提高能源系统比功率;

4) 能流效率^[29]的提升将极大地增加能量利用率,降低光储单元容量,提高飞行器的有效载荷,增强其任务执行能力。

然而,能源系统的设计与控制受到飞行器的特殊运行环境带来的诸多约束。具体表现为:

1) 空间约束^[18]:为适应临近空间的飞行环境,飞行器在结构设计上往往采用大展弦比结构,以提高升阻比,并扩大机翼面积来增加光伏发电功率;飞行器的大翼展结构促使能源系统采用集群化能源系统结构,由多个分布式发电单元互联构成;飞行器百米级尺度效应带来的光伏发电能力差异、负荷分布不平衡、储能均衡问题以及远距离功率传输效率降低等问题接踵而来。

2) 重量约束^[14]:飞行器自身重量是影响飞行器能量消耗及续航时间的关键因素之一,为此,飞行器能源系统的重量受到严格限制,表现在储能电池的容量、电力变换器数量、电力传输线和信号传输线用量等各方面,因此需要在保证原有供电能力前提下,尽可能降低DC-DC变换器的数量,由此导致系统中各分布式电源以及负荷之间的耦合增加;同时飞行器上的各模块共用通信网络,因此需要尽可能削减控制所需的信息量,降低带宽需求。

3) 能量约束^[30]:由于光伏发电单元、储能单元容量受限,并且按空间分布分为低功率等级的多个发电单元,每个发电单元的输出功率受限,在功率/电压调

节、储能均衡调节过程中调节范围不能任意大;另一方面,飞行器的各用电单元(动力系统、飞控系统以及有效载荷系统)对供电能量大小、供电品质以及动态响应的需求千差万别,且飞行器的海拔高度波动范围大、经纬度覆盖范围广、昼夜温差大、随机干扰因素多,因此能源系统还需应对发电和用电功率频繁波动且难以预测的问题。

综上,能源系统设计离不开对飞行器特点及多种约束的综合考量。目前,针对长航时太阳能飞行器能源系统的结构设计和理论研究已有相关成果^[31]。Shiau等^[14]总结了飞行器能源系统的硬件设计以及对于空间、重量等方面的定量分析。Noth等^[32-33]设计并实现了用于火星大气层的自主飞行器能源系统。Boukoberine等^[34]对不同的电源架构进行了比较和批判性研究。

现有飞行器能源系统结构上均以机翼为单位将

光伏电池分组,即,左侧和右侧机翼上的光伏电池分别串并联构成一个分布式电源,机身上铺装的光伏电池也可独立成为一个电源节点。储能电池组串接入母线以平滑发电功率波动。随着太阳能飞行器能源系统电压、功率等级的提升,能源系统规模和复杂度不断增加,大规模的串并联拓扑难以实现对电池单元更细致的监测与控制,由此引发了集群化能源系统的出现。

1.2 集群化能源系统结构及建模

为适应飞行器翼展大、载重低的特点,并满足细粒度能量管理的需求,集群化能源系统以光储一体化智能发电节点为基本单元,通过网络互联,其结构如图4所示。具体而言,根据能源系统总线形式,称该能源系统为多母线能源系统。若电源节点不包含本地负荷,共同向远程负荷供电,且传输线阻抗可忽略,则能源系统简化为图5所示的单母线能源系统。

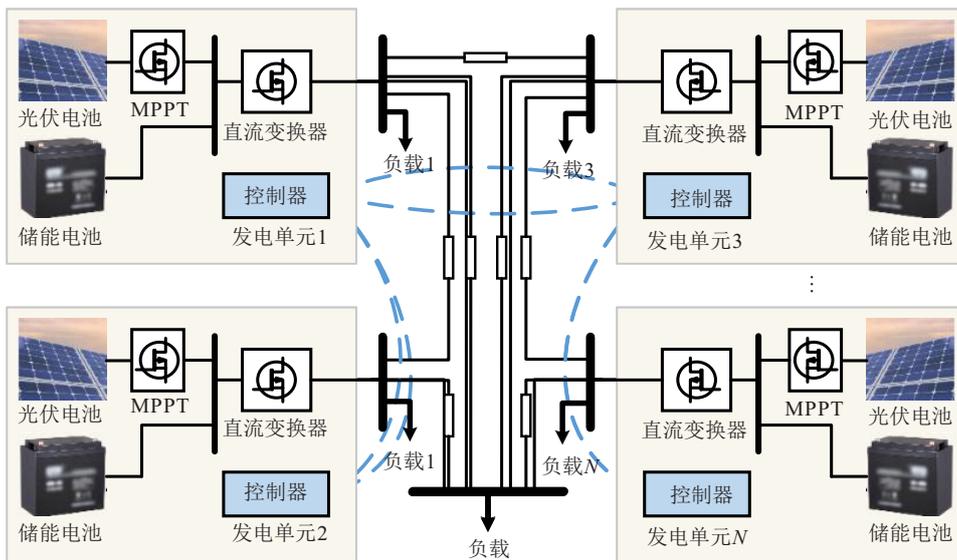


图4 多母线能源系统

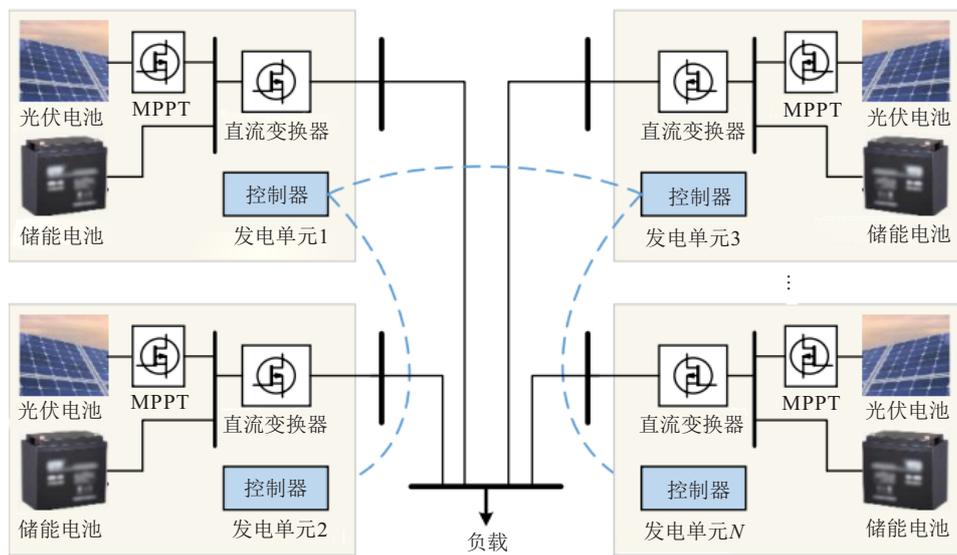


图5 单母线能源系统

能源系统由多个发电和负荷节点构成,每个发电节点包含功率等级相当的光伏电池、储能电池、DC-DC变换器以及嵌入式控制器。

光伏电池铺设于飞行器机翼表面,通过DC-DC变换器连接到内部母线。光伏电池输出功率受光照强度、温度等外部环境影响,光照强度越大环境温度越低,单位面积光伏电池阵列的输出功率越高,并且在给定的外部工况下,输出功率随电压的增大先上升再下降。为提升光能转化率,现有研究从两个方面展开,即,调节光伏电池朝向以获得最大辐照度,以及在给定光照条件下沿光伏特性曲线进行最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)。最大化辐照度可通过调整飞行器姿态实现,近年来学者们提出了不同经纬度、不同时刻的光伏发电功率预测方法^[35],分析了飞行器偏航角、横滚角和俯仰角对光伏电池输出功率的影响^[36],并研究了通过飞行器航迹设计来优化光伏电池对日角度^[37-38]。此外,可通过增加旋转调节机构在不改变飞行器姿态的情况下实现对日跟踪^[36]。在确定的对日角度下,光伏发电功率可通过MPPT算法探索最大的输出功率^[39-40]。MPPT算法通过调节光伏电池输出端电压进而将光伏电池工作点移动至最大输出功率处,从而最大限度捕获太阳能。常见的算法包括扰动观察法、增量电导算法、开路电压法等^[41],但上述算法在光伏特性曲线存在多个极值点时难以保证跟踪全局最大功率点,为此出现了分布式MPPT (distributed MPPT, DMPPT) 算法^[42]。近年来,基于混合人工智能的MPPT算法表现出更快的收敛时间和更高的效率^[43],如ANFIS算法^[44]、神经网络方法^[45]、迁移强化学习^[46]等。

临近空间光照充足,受云层影响较小,同时飞行器机动性能差,光照强度变化缓慢,在临近空间环境下单纯依靠MPPT算法调整难以进一步提升光伏发电能力。因此飞行器光伏发电系统重在优化对日角度,从飞行器光伏电池布局、飞行任务轨迹规划等角度提升光伏电池发电能力。另一方面,对于大尺度太阳能飞行器,尺度效应带来光伏电池分布不均匀、朝向不统一等问题,不同位置光伏电池吸收的辐照不同,表现为不同发电单元的供电能力不同,需通过合理设计能流控制策略实现集群化能源系统的协同运行。

储能单元在平抑可再生能源发电系统的功率波动、平滑电源输出功率曲线、增强功率输出稳定性等方面发挥重要作用,是能源系统必不可少的能量缓冲环节。通常采用荷电状态(state of charge, SOC)^[47]

来反映储能水平高低,其定义为当前容量与总容量之比。从定义可知,荷电状态满足^[48]

$$S_i(t) = S_i(0) + \frac{1}{Q_i} \int_0^t I_{bi}(\tau) d\tau. \quad (1)$$

其中: $S_i \in [0, 1]$ 为储能电池 i 的荷电状态, $Q_i \in \mathbb{R}_+$ 为总容量, $I_{bi} \in \mathbb{R}$ 为储能单元的端口电流(以充电电流方向为正)。若令储能电池 i 的端口电压和充电功率分别为 $V_{bi} \in \mathbb{R}_+$ 和 $P_i \in \mathbb{R}$, 并对式(1)两边求导, 则可得到储能电池 i 的动态方程为

$$\dot{S}_i = \frac{1}{Q_i V_{bi}} P_i. \quad (2)$$

可以看出,通过对电流进行积分可得到荷电状态,但积分法会使误差累积,在大时间尺度下准确性欠佳。改进方法包括数据驱动方法^[49]、基于扩张状态观测器的方法^[50]、基于扩展Kalman滤波器的方法^[51]等。健康状态(state-of-health, SOH)是评估储能电池老化程度的关键指标。在储能电池老化特性分析方面,学者们已提出多种建模和分析方法,包括基于电化学模型的研究方法^[52-53]、基于数据的经验/半经验老化模型方法^[54-56]以及等效电路模型方法^[57-58]等。储能电池的SOH具有慢时变特性,与之相比,SOC的变化速度更快^[59],导致二者的估计和预测需在不同时间尺度下进行。然而SOC与SOH之间具有强耦合关系,使得其在估计和预测过程中相互依赖、相互影响^[60]。利用SOC与SOH间的耦合特性,Luan等^[61]提出SOC与SOH异步协同估计方法。此外,学者还通过构建一种综合电路特性-热效应-老化过程的耦合模型,剖析了SOC、SOH、温度与充放电电流之间的内在联系^[62]。临近空间昼夜温度跨度大,负荷开关频繁,准确估计储能电池充放电水平及剩余寿命对供电能力评估起到决定性作用。因此,同时考虑电路特性-热效应-老化过程的SOC与SOH联合估计方法以及基于原位测量的寿命预警具有及其重要的研究意义。

飞行器机载负荷包括动力负荷(同步电机)、配电器以及其他有效载荷,其负荷特性多种多样。具体地,将常见的负荷分为3类:

- 1) 恒电阻负荷(Z): $I_l(V_l) = -Y_l^* V_l$;
- 2) 恒电流负荷(I): $I_l(V_l) = -I_l^*$;
- 3) 恒功率负荷(P): $I_l(V_l) = -V_l^{-1} P_l^*$ 。

其中 $Y_l^* \in \mathbb{R}_+$ 、 $I_l^* \in \mathbb{R}_+$ 、 $P_l^* \in \mathbb{R}_+$ 分别表示负荷的电导、电流以及功率。实际负荷可视为3种基本负荷类型的组合,如ZIP负荷特性^[63-64]可表示为

$$I_l(V_l) = -Y_l^* V_l - I_l^* - V_l^{-1} P_l^*.$$

内部母线通过直流变换器(如Boost变换器、

Buck变换器等)将能量传出,保证输出电压和功率的可调.图6展示了Boost变换器的电路原理,其中源端是一个非理想电压源,如储能电池,负载端包含本地负荷及网络中的负荷节点.由基尔霍夫定律可得到图6中直流Boost变换器的平均模型,以此描述电感电流 $i_L(t)$ 和输出电压 $v_C(t)$ 的动态行为,其具体形式为

$$\begin{aligned} L_0 \frac{di_L(t)}{dt} &= -(1-d(t))v_C(t) + \tilde{v}_0(t), \\ C_0 \frac{dv_C(t)}{dt} &= (1-d(t))i_L(t) - \\ &\quad \left(Y_l^* v_C(t) + I_l^* + \frac{P_l^*}{v_C(t)} \right). \end{aligned} \quad (3)$$

其中: L_0 和 C_0 分别为电感值和电容值, $d(t)$ 为PWM信号占空比, $\tilde{v}_0(t)$ 为稳态工作点电压.

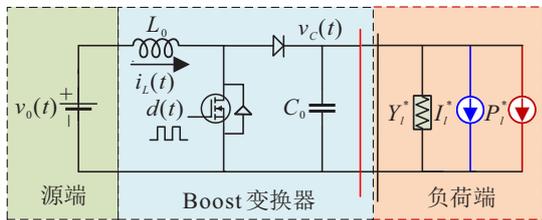


图6 Boost变换器电路图

由于临近空间飞行器能源系统面临着来自太阳能电池输出功率波动、电池储能动态变化、负载切换等方面的干扰,直流变换器的稳定性和鲁棒性分析成为能源系统分析和控制的关键问题之一^[65-67].

电源节点可通过电力传输线与其他电源节点连接,从而实现远程功率援助.电源节点之间的连接关系可采用图论工具来建模.对于带有 N_s 个电源节点和 N_l 个负荷节点的多母线能源系统,将电源节点视为正功率节点,向外输出功率,负荷节点为负功率节点,吸收功率,则能源系统的电源节点和负荷节点可统一看作功率节点,用一个含有 $N_s + N_l$ 个顶点的图描述,即 $\mathcal{G}_G \triangleq (\mathcal{V}_G, \mathcal{E}_G)$.集合 $\mathcal{V}_G = \{\mathcal{V}_{G1}, \mathcal{V}_{G2}, \dots, \mathcal{V}_{G(N_s+N_l)}\}$ 代表能源系统中的功率节点, $\mathcal{E}_G = \mathcal{V}_G \times \mathcal{V}_G$ 表示功率节点间的电力传输线.若节点 i 与节点 j 之间有电气连接,则 $(\mathcal{V}_{Gi}, \mathcal{V}_{Gj}) \in \mathcal{E}_G$.关联矩阵定义为 $B \triangleq [b_{ij}]_{|\mathcal{V}_G| \times |\mathcal{E}_G|}$,元素 b_{ij} 表示顶点 \mathcal{V}_i 与连边 \mathcal{E}_j 是否关联,具体取值为

$$\begin{cases} b_{ij} = 1, \mathcal{V}_{Gi} \text{ 是 } \mathcal{E}_{Gij} \text{ 的起点;} \\ b_{ij} = -1, \mathcal{V}_{Gi} \text{ 是 } \mathcal{E}_{Gij} \text{ 的终点;} \\ b_{ij} = 0, \mathcal{V}_{Gi} \text{ 与 } \mathcal{V}_{Gj} \text{ 间不存在传输线.} \end{cases}$$

定义电导矩阵 $\Gamma \triangleq \text{diag}\{Y_1, Y_2, \dots, Y_{|\mathcal{E}_G|}\}$,其中 $Y_i \in \mathbb{R}_+$ 表示第 i 条传输线上的电导.记电源节点和负荷节点的电压分别为 $V_s = [V_1, \dots, V_{N_s}]^T \in \mathbb{R}^{N_s}$, $V_l =$

$[V_1, \dots, V_{N_l}]^T \in \mathbb{R}^{N_l}$,电源节点和负荷节点的注入电流分别为 $I_s = [I_1, \dots, I_{N_s}]^T \in \mathbb{R}^{N_s}$, $I_l = [I_1, \dots, I_{N_l}]^T \in \mathbb{R}^{N_l}$,则有

$$\begin{bmatrix} I_s \\ I_l \end{bmatrix} = B\Gamma B^T \begin{bmatrix} V_s \\ V_l \end{bmatrix} \triangleq \begin{bmatrix} Y_{ss} & Y_{sl} \\ Y_{ls} & Y_{ll} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_s \\ V_l \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中 Y_{ss} 、 Y_{sl} 、 Y_{ls} 和 Y_{ll} 为电导矩阵.

对于图4所示的单母线能源系统,其传输线电导无穷大,有 $V_i = V_j, \forall i, j \in \{1, 2, \dots, N_s\}$, $\sum_{i=1}^{N_s} I_i = I_l$.

与电气网络并行地构建通信网络,如图4中虚线所示,实现了电源节点间的信息交互,从而支撑系统的自主协同控制.

为满足临近空间飞行器逐步扩大的任务需求,能源系统将朝着更大规模、更多负荷类型以及更灵活可靠的方向发展.为此,具有多母线结构的集群化能源系统在模块化重组、灵活重构组网、分区自治协调等方面具有更大优势.能源系统的模块化和网络化对分布式节点协同控制精度、节点切入切出情况下的鲁棒性以及网络拓扑切换适应性提出更高要求.

2 集群化能源系统能流控制

针对集群化能源系统,控制各发电单元协调运行,维持能源系统电压稳定和功率平衡是能流控制的首要任务.在飞行器应用环境中,能源系统的电压调节面临着诸多挑战.高空飞行的边界条件限制和光伏、负荷的随机变化导致电压频繁波动,系统稳定性降低,有效载荷的多样化用电需求及大范围电流变化特点对能源系统的能流控制提出更高要求.此外,大尺度布局结构和高效能量传输需求与储能均衡性

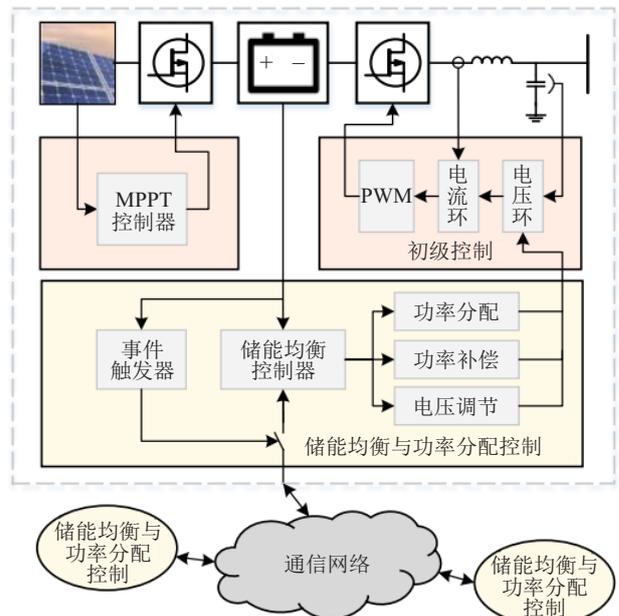


图7 飞行器能源系统控制系统结构

表2 能源系统电压调节、功率分配及储能均衡的部分研究成果

年度	文献	模式	调压	均流	均衡	鲁棒	PnP	负荷	主要方法
2018	[68]	分散式	✓			✓	✓	CPL	将电压控制问题转化为具有结构约束的凸优化问题
2020	[69]	分散式	✓			✓	✓	CPL	二自由度反馈前馈电压控制框架
2020	[70]	分布式	✓	✓		✓	✓	CPL	事件触发分布式二次 H_∞ 一致性
2020	[71]	分布式	✓	✓				-	基于PI的一致性算法, 转化为优化问题
2021	[72]	分散式		✓		✓	✓	ZIP	改进非线性限流控制器
2022	[73]	分布式		✓	✓		✓	-	改进双象限SOC加权控制, 分布式优化控制
2022	[74]	分布式		✓	✓		✓	-	基于SOC的双向变换器二次控制
2022	[75]	分布式	✓	✓	✓	✓	✓	CPL	基于动态事件触发通信的分布式二次 H_∞ 一致性
2022	[28]	分布式	✓	✓	✓		✓	-	基于SOC一致性的补偿功率跟踪策略
2023	[76]	分散式	✓			✓	✓	ZIP	局部输入状态稳定性

形成矛盾. 针对能源系统的上述问题, 现已开展的研究内容涵盖电压调节与功率分配、储能均衡控制以及通信受限下能流控制问题, 其控制系统结构如图7所示. 表2列举了部分代表性工作.

2.1 电压调节与功率分配

飞行器能源系统无外部稳定电压做支撑, 如何建立稳定的节点电压以及多电源节点互联情况下的功率分配是能源系统控制问题中的首要问题, 也是决定电能质量的关键环节.

在飞行器能源系统中, 电压调节问题是指为每个发电节点的DC-DC变换器设计控制律, 使得发电节点输出电压保持在正常工作范围, 确保本地负荷正常工作. 针对光伏、负荷功率波动等问题, 通过有效的DC-DC变换器控制策略抑制母线电压波动^[77-78], 其中非奇异终端滑模控制^[79]、多模型预测控制^[80]等控制方法均实现了电压控制精度的有效提升. 在负荷工作点大范围迁移时, DC-DC变换器控制环路应能够快速做出响应动作, 调整输出电压至参考值. 为提高系统的瞬态响应速度, 学者提出了 V^2 控制方法^[81-83], 将输出电压的反馈信号与变换器内部基准信号的误差放大信号作为调制比较器的基准电压, 使比较器的基准电压在调节输出电压的同时得到实时的调整. 此外, 利用前馈技术对电感电流进行采样, 将电感电流的采样信号与输出电压的反馈信号叠加, 消除输出电压滞后于电感电流所造成的响应延迟的影响, 从而提高瞬态响应速度^[84].

近年来, 基于智能算法的方法在解决飞行器能源系统的电压调节问题上表现出极大潜力. 其中, 深度强化学习、遗传算法和模糊控制等技术被广泛应用. 深度强化学习通过建立智能体与环境的交互, 利

用神经网络进行价值函数的估计和策略的优化, 实现了自适应的电压调节^[85-87]. 模糊控制则利用模糊逻辑和规则来处理电压调节问题中的不确定性和模糊性^[88-89]. 这些方法通过学习和自主探索, 能够自适应地调节电压并在不同工况下实现稳定的电源供应. 值得注意的是, 电压调节问题仍然存在一些挑战, 例如算法的收敛性、实时性和鲁棒性等.

功率分配问题也称均流问题, 是指多电源节点组网过程中, 通过控制各电源节点的端口电压/电流实现输出功率按比例分配, 即对于给定的正向量 $(k_1, k_2, \dots, k_{N_s})$, 电源节点的输出功率 P_i 满足

$$\frac{P_i}{k_i} = \frac{P_j}{k_j}, \forall i, j \in \{1, 2, \dots, N_s\}.$$

针对功率分配问题, 目前的主流方法包括下垂控制和一致性控制, 二者均要求电源节点工作于电压源模式, 通过调节电压源的输出电压实现功率的分配.

下垂控制是一种分散式控制方法, 假定能源系统电源节点间的传输线无阻抗, 即, 相互并联的电压源的输出电压均相同, 通过设置下垂系数引入虚拟阻抗, 限制输出电流, 从而实现输出功率调节^[90]. 可以看出下垂系数的选择对电压调节精度和功率分配精度起到了决定性作用. 下垂系数过大将导致电压低于参考电压, 无法满足负荷对电能质量的要求, 此时可借助二次控制来进行电压补偿^[91]; 下垂系数较小时, 传输线固有阻抗相较于虚拟阻抗不可忽略, 功率分配受线路阻抗影响, 精度下降. 为此, 学者深入讨论了参数选择对下垂控制性能的影响^[92-94], 并以传统下垂控制为基础, 提出多种下垂控制方法, 包括鲁棒下垂控制法^[95]、自适应下垂法^[96]等. 分散式控制方法设计时无需考虑系统中节点数据、联络方式等因

素,控制器设计不需要其他节点参数信息.然而,当功率分配比例需求与电源节点供电能力密切相关时,往往需要构建上层集中决策单元进行实时比例调节,系统对单一节点故障的容错能力下降.

多智能体系统在分布式电源系统领域已有广泛应用^[97].在集群化能源系统中,每个独立的发电单元具有独立的感知、决策和控制能力,通过通信网络与其他发电单元进行点对点通信,实现系统状态信息的局部共享.发电单元的控制器依靠自身节点和邻居节点反馈的信息生成控制信号,即,对于含有 N_s 个发电单元的能源系统,令 $x_i(i=1,2,\dots,N_s)$ 表示第 i 个节点的内部信息通过通信网络 $\mathcal{G}_c=(\mathcal{V}_c,\mathcal{E}_c)$ 进行信息交互,获取邻居节点的信息 $x_j(j\in\mathcal{N}_{ci})$,进而构造一致性误差

$$e_i(t) = \sum_{j\in\mathcal{N}_{ci}} (x_i(t) - x_j(t)).$$

其中 \mathcal{V}_c 为发电节点集合, \mathcal{E}_c 为发电节点间的通信链路, $\mathcal{N}_{ci}\subset\mathcal{V}_c$ 为网络 \mathcal{G}_c 中节点 i 的邻居节点集.由于智能体之间彼此对等,在单一发电单元因故障切除后,剩余节点仍可组件新的网络,只要存在稳态工作点,系统依然可达成一致性,因此系统对单节点切入切出的容错能力得到增强.

基于多智能体系统一致性的功率分配方法将能源系统建模为多智能体系统,将功率分配问题转化为一致性问题^[98-100],是一种典型的分布式控制方法.在该框架下,可将电源节点的输出电压作为控制量,根据各功率节点的动态特性(3)及互联拓扑下的欧姆定律(4),调节各节点的吞吐功率,达到期望的控制目标.多智能体系统模型与集群化能源系统的分布式结构具有高度相似性,基于一致性的协同控制方法保持了分散式控制的即插即用(plug-and-play,PnP)能力,且与其他方法相比,其对能源系统拓扑变化的鲁棒性和灵活性更高,是临近空间应用的主要设计方法.

2.2 储能均衡控制

对于集群化能源系统,多个电源节点发电能力受外部因素影响而表现出差异性,储能水平可以很好地表征电源节点维持能源系统电压稳定和功率平衡的能力.同时作为可再生能源的必要组成部分,储能系统在平滑可再生能源发电曲线方面发挥着重要作用^[101].然而,飞行器的尺度效应导致不同发电单元发电量和负荷消耗不同,且电池单体的参数存在差异,在多个充放电周期之后,电池储电量差异性会逐渐增大.如果缺乏行之有效的均衡策略则无法保证

系统安全运行.例如,如果所有储能单元以相同的功率释放能量,则存储能量较少的单元由于电池端电压较低,在耗尽之前放电速度更快,若其电量耗尽,为避免过放,则必须立即将其从系统中切除,此时,原本由该节点提供的功率负担不得不改由其他单元分担.类似的情况将相继发生,最终发生级联故障.因此,电池组的均衡性成为电池组管理的核心问题,引起了广泛关注^[102-103].

储能均衡控制是指通过设计有效的控制策略使得各发电节点的储能单元荷电状态保持一致,即 $S_i=S_j,i,j=1,2,\dots,N_s$.现有的储能均衡策略主要分为能量耗散型均衡和能量非耗散型均衡两类^[104].能量耗散型均衡方法在电阻上消耗多余的电能,虽易于实现但造成较高的能量损耗,不适用于能量利用率要求极高的飞行器能源系统.能量非耗散型均衡(又称主动均衡)通过在电池组之间进行能量转移^[105]实现均衡的目的.考虑到飞行器能源紧缺,耗散型均衡不适用于飞行器能源系统.

关于非耗散型均衡已涌现出许多方案,包括集中式方案^[106-107]和分布式方案^[108-110].在集中式方案中,中央控制器需通过通信网络来收集所有电源节点的信息,结合预测曲线和期望的荷电状态对各节点进行协调.该方案虽简单可行,但对中央控制器的依赖使得系统的可靠性显著降低^[111],中央节点的失效将导致系统全部瘫痪.多智能体系统理论可有效建模和分析多个电源节点与负荷节点之间的状态演化规律,这导致传统的集中式控制策略逐渐被单层或多层多智能体控制结构所取代,系统的鲁棒性、可靠性以及可扩展性得到明显提升^[97].Zhang等^[28]针对飞行器集群化能源系统提出的分布式储能均衡策略采用多智能体系统建模和控制器设计方法,以“能者多劳”的方式进行储能均衡,即,通过调节各节点的输出功率,实现储能水平高的节点对低电量节点进行远距离能量调度,从而达到能源系统不同节点间的储能均衡性.

2.3 事件触发能流控制

集群化能源系统的协调运行离不开功率节点间的有效通信,然而飞行器上的通信资源不足,可用于能源系统协同控制的通信带宽严重不足.事件触发通信方式起初应用于网络化控制系统,采用按需通信的策略,可在保证系统稳定性的前提下节约大量通信资源^[112-115].随后,学者将事件触发通信机制应用于多智能体系统,包括单积分^[116]、双积分^[117]、一般线性^[118-119]、非线性^[120-122]多智能体系统,为通信受限

多智能体系统的分布式控制问题提供有效的解决方案。

对于多智能体系统,事件触发控制可分为事件触发控制器更新^[123-126]和事件触发通信两类。在每一时刻 t ,事件触发控制器更新策略利用上次触发时刻 t_{k-1} 更新的状态得到 $(t_{k-1}, t]$ 反馈控制信号,从而避免控制器频繁更新,但触发器需与邻居保持实时通信以校验触发条件,因此该方法适用于控制器更新成本较高的情形。在事件触发通信策略中,反馈控制信号和触发条件检验均只采用 t_{k-1} 时刻更新的数据,因此通信次数得以降低,适用于通信带宽受限的飞行器能源系统。另一方面,事件触发通信策略可根据状态更新方式分为两类:

1) 基于相对测量的控制量更新策略^[127-129],即对于节点 i ,其一致性误差反馈具有

$$e_i(t) = \sum_{i \in \mathcal{N}_{ci}} (x_i(t_k^i) - x_j(t_k^i))$$

形式,其中 t_k^i 是节点 i 的上一次触发时刻。可以看出,节点 i 触发通信和控制器更新时需获取所有邻居节点同一时刻的状态,或所有邻居节点进行同步触发,或节点 i 主动测量与邻居节点的信息差,因此该控制器更新规则适用于带有相对位置采样的情景。

2) 基于广播的触发策略^[117,130-131],其一致性误差反馈具有

$$e_i(t) = \sum_{i \in \mathcal{N}_{ci}} (x_i(t_{k_i}^i) - x_j(t_{k_j}^j))$$

形式,其中 $t_{k_i}^i$ 和 $t_{k_j}^j$ 分别是节点 i 和 j 的上一次触发时刻。系统采用异步触发机制,不要求节点同步触发,只利用邻居节点上次通信时广播的状态缓存信息构建误差反馈,因此该方案的信道占用率更低,更适用于临近空间飞行器能源系统。

现有研究表明,将事件触发机制应用于能源系统中的分布式功率分配问题,可保证分配精度的同时降低通信成本^[132-133]。此外,Zhang等^[134]为综合能源系统设计了事件触发分布式混合控制策略。为避免出现Zeno现象,Shi等^[135]提出了一种基于采样数据的时间触发机制,并将协同控制问题转化为优化问题,增强了系统在极端情况下的恢复能力。

3 集群化能源系统能量调度

集群化能源系统的能量调度关注能源系统在小时-天时间尺度上的能量平衡、能流效率问题,优化储能单元的循环寿命,保证能源系统在长达数月的飞行过程中提供持续有效的能量供给,即续航末期储能电池的储电量和健康状态仍可满足飞行器的能量需

求。本节从能量最优调度方面综述现有研究成果。

尽管能量平衡对长航时飞行的重要性已为人熟知,并有学者从不同角度建立了平衡准则,但在长时间飞行过程中,飞行器运行工况经历大范围周而复始的复杂变化,影响能源系统状态的外部因素众多,且多种物理场高度耦合,如何在多样化负荷需求和不稳定运行工况下进行能量的有效利用仍是一个开放问题。且随着能源系统规模的增大,复杂度的提升以及负荷需求的多样化转变,传统基于优化的能量调度策略显露短板。

随着计算机技术和人工智能技术的飞速发展,强化学习(reinforcement learning, DRL)方法表现出极强的自学能力和处理复杂任务的能力。本质上,强化学习算法通过将能源系统的能量调度问题建模为转移概率未知的马尔科夫决策过程,通过智能体和环境的交互来获取经验,进而根据经验选取最优决策,避免了能源系统和运行环境精确模型的建立,具有更强的环境适应性和鲁棒性。

多智能体强化学习(multi-agent reinforcement learning, MARL)将强化学习的思想与多智能体系统结构相结合,常见结构如图8所示。其基本思想是将系统分为 N 个具有独立学习能力的智能体,通过集中学习或分布学习方式,使得每个智能体都获得一个能够最大化回报

$$J(\pi) = \mathbb{E} \left[\sum_{t=0}^T \frac{1}{N} \gamma^t \sum_{i=1}^N r_t^i \right]$$

的策略 $\pi^i(\cdot | s_t)$ 。其中: $\pi(a^1, a^2, \dots, a^N | s)$ 为联合策略, \mathbb{E} 表示期望, T 为系统的运行时间, $\gamma \in (0, 1)$ 为回报 r_t^i 的折扣因子。若 γ 值较小则策略过度关心短期收益,可能使策略模型陷入局部最优,反之, γ 较大将降低稳定性。定义价值函数

$$V_{\pi^i}(s) = \mathbb{E} \left[\sum_{t=0}^T \gamma^t R^i(s_t, a_t^i) | a_t^i \sim \pi^i(\cdot | s_t) \right],$$

其中 R^i 、 a_t^i 、 s_t 分别为智能体 i 的奖励函数、 t 时刻动作以及环境反馈。进而最优策略可表示为

$$\pi^{*i} = \arg \max_{\pi^i} V_{\pi^i}(s).$$

类似地,定义动作空间 \mathcal{A} 及状态-动作价值函数

$$Q_{\pi^i}(s_t, \mathbf{a}_t) = R^i(s_t, a_t^i) + \gamma V_{\pi^i}(s_{t+1}),$$

则最优策略可表示为

$$\pi^{*i} = \arg \max_{\mathbf{a} \in \mathcal{A}} Q_{\pi^i}(s, \mathbf{a}).$$

表3列举了几种主要强化学习方法的目标问题与特点。强化学习方法在能源系统中已有广泛应用^[143-144]。基于DQN、DDQN、DDPG以及SAC等方法

求. 针对拓扑可重构能源系统, 提升电气拓扑未知、节点切入切出和负荷功率波动情况下的控制参数自适应能力和系统控制鲁棒性, 以应对不同用电模式以及动态变化的能量需求, 提升即插即用能力.

3) 飞行器能源管理系统需在环境变化、任务变更乃至发电节点故障情况下及时切换应对策略. 目前针对太阳能飞行器能源系统的智能化水平仍较低, 自主调度能力欠佳, 机器学习方法尚未有效应用, 亟待解决能量平衡、能流效率以及储能电池循环寿命的共同优化等关键问题.

4) 能源系统能量调度策略的学习对飞行器能源系统多维度物理场景仿真提出更高要求, 有待开发涵盖飞行器动力学、光照模型、大气模型以及能源-动力系统的全闭环、多场景仿真测试环境, 构建训练数据集和测试数据集, 服务于能量自主调度策略的研发.

参考文献(References)

- [1] 刘乾石, 徐国宁, 李兆杰, 等. 不规则太阳电池临近空间发电模型构建与分析[J]. 太阳能学报, 2022, 43(7): 73-79.
(Liu Q S, Xu G N, Li Z J, et al. Research and analysis of irregular solar cells power generation model in near space[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2022, 43(7): 73-79.)
- [2] 侯中喜, 高显忠, 郭正, 等. 太阳能飞机: 高空长航时飞行关键问题[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
(Hou Z X, Gao X Z, Guo Z, et al. Solar-powered aircraft the crucial problem about the high-altitude long-endurance flight [M]. Beijing: Science Press, 2021.)
- [3] 赵炜, 赵钱, 黄江流, 等. 临近空间太阳能无人机在现代战争中的应用[J]. 空天防御, 2020, 3(2): 85-90.
(Zhao W, Zhao Q, Huang J L, et al. Application of near space solar powered UAV in modern war[J]. Air & Space Defense, 2020, 3(2): 85-90.)
- [4] 黄宛宁, 张晓军, 李智斌, 等. 临近空间科学技术的发展现状及应用前景[J]. 科技导报, 2019, 37(21): 46-62.
(Huang W N, Zhang X J, Li Z B, et al. Development status and application prospect of near space science and technology[J]. Science & Technology Review, 2019, 37(21): 46-62.)
- [5] Araniti G, Iera A, Molinaro A. The role of HAPs in supporting multimedia broadcast and multicast services in terrestrial-satellite integrated systems[J]. Wireless Personal Communications, 2005, 32(3): 195-213.
- [6] 李怡勇, 李智, 沈怀荣. 临近空间飞行器发展与应用分析[J]. 装备指挥技术学院学报, 2008, 19(2): 61-65.
(Li Y Y, Li Z, Shen H R. Analysis on development and application of near space vehicle[J]. Journal of the Academy of Equipment Command & Technology, 2008, 19(2): 61-65.)
- [7] 杨虹, 张雅声, 丁文哲. 探测临近空间高声速目标的飞艇组网方法研究[J]. 现代防御技术, 2017, 45(2): 40-48.
(Yang H, Zhang Y S, Ding W Z. Networking design of airship for detecting high dynamic target in near space[J]. Modern Defence Technology, 2017, 45(2): 40-48.)
- [8] 赵亮, 董鹏署, 李宗亭, 等. 平流层飞艇载SIAR系统作战能力分析[J]. 舰船电子对抗, 2018, 41(1): 42-44.
(Zhao L, Dong P S, Li Z T, et al. Operational capability analysis of stratospheric airship-board SIAR system[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2018, 41(1): 42-44.)
- [9] Katikala S. Google project loon[J]. In Sight: Rivier academic Journal, 2014, 10(2): 1-6.
- [10] Nagpal L, Samdani K. Project Loon: Innovating the connectivity worldwide[C]. The 2nd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology. Bangalore, 2017: 1778-1784.
- [11] Li C L, Luo R Y, Chen T X. New idea for stratospheric communications—Google loon[J]. Communications Technology, 2015, 48: 125-129.
- [12] AALTO HAPS Limited. Zephyr home page[EB/OL]. [2024-01-05]. <https://www.aaltohaps.com/zephyr>.
- [13] 马东立, 张良, 杨穆清, 等. 超长航时太阳能无人机关键技术综述[J]. 航空学报, 2020, 41(3): 623418.
(Ma D L, Zhang L, Yang M Q, et al. Review of key technologies of ultra-long-endurance solar powered unmanned aerial vehicle[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(3): 623418.)
- [14] Shiau J K, Ma D M, Yang P Y, et al. Design of a solar power management system for an experimental UAV[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2009, 45(4): 1350-1360.
- [15] Gao X Z, Hou Z X, Guo Z, et al. Reviews of methods to extract and store energy for solar-powered aircraft[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 44: 96-108.
- [16] 金礼芬, 蒲建, 杨文斌, 等. 太阳能无人机的能源系统技术与发展趋势[J]. 信息记录材料, 2022, 23(6): 13-16.
(Jin L F, Pu J, Yang W B, et al. Overview of solar powered UAV development[J]. Information Recording Materials, 2022, 23(6): 13-16.)
- [17] 曲鹏, 王寅. 太阳能无人机电源系统的发展现状与展望[J]. 电源技术, 2015, 39(4): 864-866.
(Qu P, Wang Y. Development status and prospect of solar power systems for UAVs[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2015, 39(4): 864-866.)
- [18] 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.)
- [19] 李晨飞, 姜鲁华. 临近空间长航时太阳能无人机研究现状及关键技术[J]. *中国基础科学*, 2018, 20(2): 22-31.
(Li C F, Jiang L H. Research status and key technology of near space long endurance high altitude solar-powered unmanned air vehicle[J]. *China Basic Science*, 2018, 20(2): 22-31.)
- [20] 向锦武, 阚梓, 邵浩原, 等. 长航时无人机关键技术研究进展[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2020, 52(6): 57-77.
(Xiang J W, Kan Z, Shao H Y, et al. A review of key technologies for long-endurance unmanned aerial vehicle[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2020, 52(6): 57-77.)
- [21] Gao X Z, Hou Z X, Guo Z, et al. Research on characteristics of gravitational gliding for high-altitude solar-powered unmanned aerial vehicles[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers—Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2013, 227(12): 1911-1923.
- [22] Roney J A. Statistical wind analysis for near-space applications[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2007, 69(13): 1485-1501.
- [23] Shiau J K, Ma D M, Chiu C W, et al. Optimal sizing and cruise speed determination for a solar-powered airplane[J]. *Journal of Aircraft*, 2010, 47(2): 622-629.
- [24] Spangelo S C, Gilbert E G. Power optimization of solar-powered aircraft with specified closed ground tracks[J]. *Journal of Aircraft*, 2013, 50(1): 232-238.
- [25] Lee J S, Yu K H. Optimal path planning of solar-powered UAV using gravitational potential energy[J]. *IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems*, 2017, 53(3): 1442-1451.
- [26] 仲维国, 郭有光, 张凯. 太阳能飞机循环飞行的高度剖面能量策略[J]. *航空学报*, 2020, 41(3): 623429.
(Zhong W G, Guo Y G, Zhang K. Energy strategy on altitude profile for cycle flight of solar powered aircraft[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(3): 623429.)
- [27] 高显忠. 基于重力势与风梯度的太阳能飞行器HALE问题研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.
(Gao X Z. Research on HALE problem of solar vehicle based on gravity potential and wind gradient[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014.)
- [28] Zhang Z C, Zuo Z Q, Wang Y J. Distributed control for state-of-charge balance and load voltage regulation in DC microgrids with clustered generations[J]. *Asian Journal of Control*, 2022, 24(6): 3456-3465.
- [29] Wang F, Sun X, He X, et al. Research on energy optimal control strategy of DCPV-energy storage system for unmanned aerial vehicle[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2021, 9(3): 2643-2651.
- [30] Shakhathreh H, Sawalmeh A H, Al-Fuqaha A, et al. Unmanned aerial vehicles(UAVs): A survey on civil applications and key research challenges[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 48572-48634.
- [31] Sun K, Liang G, Guo S, et al. Design and simulation of energy system for stratospheric airships[C]. *IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*. Piscataway: IEEE, 2018, 164-170.
- [32] Noth A, Engel M, Siegwart R. Flying solo and solar to Mars—Global design of a solar autonomous airplane for sustainable flight[J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2006, 13(3): 44-52.
- [33] Noth A. Design of solar powered airplanes for continuous flight[D]. Zurich: ETH Zürich, 2008.
- [34] Boukoberine M N, Zhou Z B, Benbouzid M. Power supply architectures for drones—A review[C]. *IECON 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Lisbon, 2019: 5826-5831.
- [35] Wang H F, Song B F, Zuo L K. Effect of high-altitude Airship's attitude on performance of its energy system[J]. *Journal of Aircraft*, 2007, 44(6): 2077-2080.
- [36] Zhu W Y, Xu Y M, Li J, et al. Performance analysis of rotatable energy system of high-altitude airships in real wind field[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2020, 98: 105689.
- [37] Klesh A T, Kabamba P T. Solar-powered aircraft: Energy-optimal path planning and perpetual endurance[J]. *Journal of Guidance Control Dynamics*, 2009, 32(4): 1320-1329.
- [38] Zhu W Y, Li J, Xu Y M. Optimum attitude planning of near-space solar powered airship[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2019, 84: 291-305.
- [39] Alrubaia A J, Al-Khaykan A, Malik R Q, et al. Review on MPPT techniques in solar system[C]. *International Engineering Conference on Sustainable Technology and Development*. Piscataway: IEEE, 2022: 123-128.
- [40] Başoğlu M E. Comprehensive review on distributed maximum power point tracking: Submodule level and module level MPPT strategies[J]. *Solar Energy*, 2022, 241: 85-108.
- [41] Avila E, Jaramillo A, Costa J, et al. Energy management of a solar-battery powered fixed-wing UAV[C]. *International Conference on Information Systems and Computer Science*. Quito, 2018: 180-185.
- [42] Jiang J H, Zhang T, Chen D L. Analysis, design, and implementation of a differential power processing DMPPT with multiple buck-boost choppers for photovoltaic module[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, 36(9): 10214-10223.
- [43] Taylor A, Musa S M. Evaluation of hybrid AI-based

- techniques for MPPT optimization[C]. International Conference on Green Energy, Computing and Sustainable Technology. Miri Sarawak, 2022: 371-375.
- [44] Aldair A A, Obed A A, Halihal A F. Design and implementation of ANFIS-reference model controller based MPPT using FPGA for photovoltaic system[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 82: 2202-2217.
- [45] Shyam S, Ghosh A. Study on artificial neural network based MPPT algorithm in PV application[C]. IEEE 3rd International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation. Piscataway: IEEE, 2023: 1-6.
- [46] 杨博, Thidar Swe, 钟林恩, 等. 阴影条件下基于迁移强化学习的光伏系统最大功率跟踪[J]. 控制与决策, 2020, 35(12): 2939-2949.
(Yang B, Swe T, Zhong L E, et al. Transfer reinforcement learning based maximum power point tracker of PV systems under partial shading condition[J]. Control and Decision, 2020, 35(12): 2939-2949.)
- [47] 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.)
- [48] Lu X N, Sun K, Guerrero J M, et al. State-of-charge balance using adaptive droop control for distributed energy storage systems in DC microgrid applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(6): 2804-2815.
- [49] Deng Z W, Hu X S, Lin X K, et al. Data-driven state of charge estimation for lithium-ion battery packs based on Gaussian process regression[J]. Energy, 2020, 205: 118000.
- [50] Sun L, Li G R, You F Q. Combined internal resistance and state-of-charge estimation of lithium-ion battery based on extended state observer[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 131: 109994.
- [51] Sun D M, Yu X L, Wang C M, et al. State of charge estimation for lithium-ion battery based on an intelligent adaptive extended Kalman filter with improved noise estimator[J]. Energy, 2021, 214: 119025.
- [52] Gao J, Shi S Q, Li H. Brief overview of electrochemical potential in lithium ion batteries[J]. Chinese Physics B, 2016, 25(1): 119-142.
- [53] Park S, Kato D, Gima Z, et al. Optimal experimental design for parameterization of an electrochemical lithium-ion battery model[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2018, 165(7): A1309-A1323.
- [54] Petit M, Prada E, Sauvart-Moynot V. Development of an empirical aging model for Li-ion batteries and application to assess the impact of Vehicle-to-Grid strategies on battery lifetime[J]. Applied Energy, 2016, 172: 398-407.
- [55] Wang J, Liu P, Hicks-Garner J, et al. Cycle-life model for graphite-LiFePO₄ cells[J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(8): 3942-3948.
- [56] Baghdadi I, Briat O, Deletage J Y, et al. Lithium battery aging model based on Dakin's degradation approach[J]. Journal of Power Sources, 2016, 325: 273-285.
- [57] Wehbe J, Karami N. Battery equivalent circuits and brief summary of components value determination of lithium ion: A review[C]. The 3rd International Conference on Technological Advances in Electrical, Electronics and Computer Engineering. Piscataway: IEEE, 2015: 45-49.
- [58] Yannliaw B. Modeling of lithium ion cells? A simple equivalent-circuit model approach[J]. Solid State Ionics, 2004, 175(1/2/3/4): 835-839.
- [59] Cen Z H, Kubiak P. Lithium-ion battery SOC/SOH adaptive estimation via simplified single particle model[J]. International Journal of Energy Research, 2020, 44(15): 12444-12459.
- [60] Xiao D X, Fang G L, Liu S, et al. Reduced-coupling coestimation of SOC and SOH for lithium-ion batteries based on convex optimization[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(11): 12332-12346.
- [61] Luan Z K, Zhao W Z, Wang C Y. Research on variable time-scale SOC and SOH asynchronous collaborative estimation strategy for electric vehicle power lithium iron phosphate batteries[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 73: 108826.
- [62] Hu X S, Zheng Y S, Lin X K, et al. Optimal multistage charging of NCA/graphite lithium-ion batteries based on electrothermal-aging dynamics[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2020, 6(2): 427-438.
- [63] Nahata P, Soloperto R, Tucci M, et al. A passivity-based approach to voltage stabilization in DC microgrids with ZIP loads[J]. Automatica, 2020, 113: 108770.
- [64] Fan B, Peng J, Yang Q, et al. Distributed control of DC microgrids with improved ZIP load adaptability[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2022, 52(7): 4623-4633.
- [65] Wang Z, Li S H, Li Q. Continuous nonsingular terminal sliding mode control of DC-DC boost converters subject to time-varying disturbances[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2020, 67(11): 2552-2556.
- [66] Andrés-Martínez O, Flores-Tlacuahuac A, Ruiz-Martínez O F, et al. Nonlinear model predictive stabilization of DC-DC boost converters with constant power loads[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(1): 822-830.
- [67] Kobaku T, Jeyasenthil R, Sahoo S, et al. Quantitative feedback design-based robust PID control of voltage mode controlled DC-DC boost converter[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2021, 68(1): 286-290.

- [68] Sadabadi M S, Shafiee Q, Karimi A. Plug-and-play robust voltage control of DC microgrids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(6): 6886-6896.
- [69] Sadabadi M S, Shafiee Q. Scalable robust voltage control of DC microgrids with uncertain constant power loads[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020, 35(1): 508-515.
- [70] Zhou J G, Xu Y L, Sun H B, et al. Distributed event-triggered H_∞ consensus based current sharing control of DC microgrids considering uncertainties[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 16(12): 7413-7425.
- [71] Shi M X, Chen X, Zhou J Y, et al. Distributed optimal control of energy storages in a DC microgrid with communication delay[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(3): 2033-2042.
- [72] Braitor A C, Konstantopoulos G C, Kadirkamanathan V. Current-limiting droop control design and stability analysis for paralleled boost converters in DC microgrids[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2021, 29(1): 385-394.
- [73] Huang B, Zheng S, Wang R, et al. Distributed optimal control of DC microgrid considering balance of charge state[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2022, 37(3): 2162-2174.
- [74] Panda M, Bhaskar D V, Maity T. An efficient SoC-balancing based power management strategy for interconnected subgrids of DC microgrid[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 50: 104287.
- [75] Wang R, Sun Q Y, Han J, et al. Energy-management strategy of battery energy storage systems in DC microgrids: A distributed dynamic event-triggered H_∞ consensus control[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2022, 52(9): 5692-5701.
- [76] Ferguson J, Cucuzzella M, Scherpen J M. Increasing the region of attraction in DC microgrids[J]. *Automatica*, 2023, 151: 110883.
- [77] 邵嘉琪, 张晓辉, 席涵宇, 等. 太阳能无人机线性自抗扰多环路能源控制[J]. *航空学报*, 2023, 44(10): 327812.
(Shao J Q, Zhang X H, Xi H Y, et al. Multi-loop energy control method of linear active disturbance rejection for solar-powered UAVs[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, 44(10): 327812.)
- [78] Ayad I A, Elwarraki E, Ali S U, et al. Optimized nonlinear integral backstepping controller for DC-DC three-level boost converters[J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 49794-49805.
- [79] Qiu C, Li H, Song Z, et al. Interactional influence analysis of DC bus voltage versus servo systems and stabilization technology for aerospace combined power supply systems[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2023, 59(2): 886-896.
- [80] Ebad M, Song B M. Accurate model predictive control of bidirectional DC-DC converters for DC distributed power systems[C]. *IEEE Power and Energy Society General Meeting. Piscataway: IEEE*, 2012: 1-8.
- [81] Ganesh V S, Singha A K. Design of stable digital V^2 controllers for the synchronous noninverting buck-boost converter[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2023, 11(3): 2826-2836.
- [82] Kapoor E, Singha A K, Madhu Sudhan Rao R. Design of a digital peak V^2 controller for the synchronous boost converter with negligible ESR[C]. *IEEE 22nd Workshop on Control and Modelling of Power Electronics. Cartagena, 2021: 1-8.*
- [83] Leng M, Zhou G, Tian Q, et al. Small signal modeling and design analysis for boost converter with valley V^2 control[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(12): 13475-13487.
- [84] Zhang X, Wang T, Bao H, et al. Stability effect of load converter on source converter in a cascaded buck converter[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2023, 38(1): 604-618.
- [85] Nishanthi B, Kanakaraj J. Enactment of deep reinforcement learning control for power management and enhancement of voltage regulation in a DC micro-grid system[J]. *Electric Power Components and Systems*, 2024, 52(4): 555-565.
- [86] Gheisarnejad M, Farsizadeh H, Khooban M H. A novel nonlinear deep reinforcement learning controller for DC-DC power buck converters[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 68(8): 6849-6858.
- [87] Meng X, Jia Y, Xu Q, et al. A novel intelligent nonlinear controller for dual active bridge converter with constant power loads[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2023, 70(3): 2887-2896.
- [88] Kaysal A, K orođlu S, Ođuz Y, et al. Design and experimental implementation of DC-DC converter based self-tuning fuzzy PI controller[J]. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 2023, 38(1): 483-495.
- [89] Nachidi M, Khenoune K, Ouachani I, et al. Takagi-sugeno fuzzy control of an interleaved DC-DC boost converter[C]. *International Conference on Sustainability in Energy and Buildings. Singapore: Springer*, 2023: 431-440.
- [90] Gao F, Bozhko S, Costabeber A, et al. Comparative stability analysis of droop control approaches in voltage-source-converter-based DC microgrids[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, 32(3): 2395-2415.
- [91] Shuai Z, Fang J, Ning F, et al. Hierarchical structure and bus voltage control of DC microgrid[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82: 3670-3682.

- [92] Haileselassie T M, Uhlen K. Impact of DC line voltage drops on power flow of MTDC using droop control[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2012, 27(3): 1441-1449.
- [93] Anand S, Fernandes B G, Guerrero J. Distributed control to ensure proportional load sharing and improve voltage regulation in low-voltage DC microgrids[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, 28(4): 1900-1913.
- [94] Gao F, Gu Y, Bozhko S, et al. Analysis of droop control methods in DC microgrid[C]. *European Conference on Power Electronics and Applications*. Piscataway: IEEE, 2014: 1-9.
- [95] Zhong Q C. Robust droop controller for accurate proportional load sharing among inverters operated in parallel[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(4): 1281-1290.
- [96] Chaudhuri N R, Chaudhuri B. Adaptive droop control for effective power sharing in multi-terminal DC (MTDC) grids[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(1): 21-29.
- [97] Negenborn R R. Multi-agent model predictive control with applications to power networks[J]. *Energy*, 2007, 21(3): 353-366.
- [98] Zhao J, Dörfler F. Distributed control and optimization in DC microgrids[J]. *Automatica*, 2015, 61: 18-26.
- [99] De Persis C, Weitenberg E R A, Dörfler F. A power consensus algorithm for DC microgrids[J]. *Automatica*, 2018, 89: 364-375.
- [100] Cucuzzella M, Trip S, de Persis C, et al. A robust consensus algorithm for current sharing and voltage regulation in DC microgrids[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2019, 27(4): 1583-1595.
- [101] Kim J Y, Jeon J H, Kim S K, et al. Cooperative control strategy of energy storage system and microsources for stabilizing the microgrid during islanded operation[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2010, 25(12): 3037-3048.
- [102] 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.
- [103] 贲礼进. 光伏发电锂电池储能均衡方法的研究[J]. *电源技术*, 2015, 39(11): 2438-2440.
(Ben L J. Research on photovoltaic power lithium battery energy storage equilibrium method[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2015, 39(11): 2438-2440.)
- [104] 郑剑. 车用锂电池智能均衡技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
(Zheng J. Research on intelligent equalization technology of automotive lithium battery[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.)
- [105] 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.
- [106] Maharjan L, Inoue S, Akagi H, et al. State-of-charge (SoC)-balancing control of a battery energy storage system based on a cascade PWM converter[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2009, 24(6): 1628-1636.
- [107] Ouoba S V M, Houari A, Machmoum M, et al. A novel resilient state of charge balancing method for distributed storage systems based autonomous microgrids[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 55: 105439.
- [108] Cai H, Hu G Q. Distributed control scheme for package-level state-of-charge balancing of grid-connected battery energy storage system[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2016, 12(5): 1919-1929.
- [109] 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.
- [110] 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.
- [111] Bidram A, Davoudi A. Hierarchical structure of microgrids control system[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2012, 3(4): 1963-1976.
- [112] Tabuada P. Event-triggered real-time scheduling of stabilizing control tasks[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2007, 52(9): 1680-1685.
- [113] Wang X F, Lemmon M D. Self-triggered feedback control systems with finite-gain L_2 stability[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2009, 54(3): 452-467.
- [114] Lunze J, Lehmann D. A state-feedback approach to event-based control[J]. *Automatica*, 2010, 46(1): 211-215.
- [115] Mazo M, Tabuada P. Decentralized event-triggered control over wireless sensor/actuator networks[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2011, 56(10): 2456-2461.
- [116] Dimarogonas D V, Frazzoli E, Johansson K H. Distributed event-triggered control for multi-agent systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2012, 57(5): 1291-1297.
- [117] Seyboth G S, Dimarogonas D V, Johansson K H. Event-based broadcasting for multi-agent average consensus[J]. *Automatica*, 2013, 49(1): 245-252.
- [118] Yang D P, Ren W, Liu X D, et al. Decentralized event-triggered consensus for linear multi-agent systems under general directed graphs[J]. *Automatica*, 2016,

- 69(C): 242-249.
- [119] Zhu W, Jiang Z P, Feng G. Event-based consensus of multi-agent systems with general linear models[J]. *Automatica*, 2014, 50(2): 552-558.
- [120] Xian C X, Zhao Y, Dong X W, et al. Event-triggered cooperative tracking for lipschitz-type multi-agent systems: An ARE-based approach[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2022, 69(1): 119-123.
- [121] Guo X G, Zhang D Y, Wang J L, et al. Adaptive memory event-triggered observer-based control for nonlinear multi-agent systems under DoS attacks[J]. *CAA Journal of Automatica Sinica*, 2021, 8(10): 1644-1656.
- [122] Shi J T. Cooperative control for nonlinear multi-agent systems based on event-triggered scheme[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2021, 68(6): 1977-1981.
- [123] Hu W F, Liu L, Feng G. Consensus of multi-agent systems by distributed event-triggered control[J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2014, 47(3): 9768-9773.
- [124] Fan H J, Zheng K H, Liu L, et al. Event-triggered finite-time consensus of second-order leader-follower multiagent systems with uncertain disturbances[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2022, 52(5): 3783-3793.
- [125] Zhang H P, Yue D, Yin X X, et al. Finite-time distributed event-triggered consensus control for multi-agent systems[J]. *Information Sciences*, 2016, 339: 132-142.
- [126] Liu J, Yu Y, Wang Q, et al. Fixed-time event-triggered consensus control for multi-agent systems with nonlinear uncertainties[J]. *Neurocomputing*, 2017, 260(C): 497-504.
- [127] Hu W, Liu L, Feng G. Consensus of linear multi-agent systems by distributed event-triggered strategy[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2016, 46(1): 148-157.
- [128] Zhang H, Feng G, Yan H, et al. Distributed self-triggered control for consensus of multi-agent systems[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2014, 1(1): 40-45.
- [129] Meng X Y, Chen T W. Event based agreement protocols for multi-agent networks[J]. *Automatica*, 2013, 49(7): 2125-2132.
- [130] Xie D, Xu S Y, Chu Y, et al. Event-triggered average consensus for multi-agent systems with nonlinear dynamics and switching topology[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2015, 352(3): 1080-1098.
- [131] Cheng B, Li Z K. Fully distributed event-triggered protocols for linear multiagent networks[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2019, 64(4): 1655-1662.
- [132] Chen Z Y, Yu X H, Xu W Y, et al. Modeling and control of islanded DC microgrid clusters with hierarchical event-triggered consensus algorithm[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2021, 68(1): 376-386.
- [133] Wang Y, Deng C, Liu D, et al. Unified real power sharing of generator and storage in islanded microgrid via distributed dynamic event-triggered control[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(3): 1713-1724.
- [134] Zhang N, Sun Q Y, Yang L X, et al. Event-triggered distributed hybrid control scheme for the integrated energy system[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2022, 18(2): 835-846.
- [135] Shi M X, Shahidepour M, Zhou Q, et al. Optimal consensus-based event-triggered control strategy for resilient DC microgrids[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(3): 1807-1818.
- [136] Sun X Z, Qiu J. Two-stage volt/var control in active distribution networks with multi-agent deep reinforcement learning method[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 12(4): 2903-2912.
- [137] Liu H T, Wu W C. Online multi-agent reinforcement learning for decentralized inverter-based volt-VAR control[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 12(4): 2980-2990.
- [138] Lei L, Tan Y, Dahlenburg G, et al. Dynamic energy dispatch based on deep reinforcement learning in IoT-driven smart isolated microgrids[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(10): 7938-7953.
- [139] Qin Z, Liu D, Hua H, et al. Privacy preserving load control of residential microgrid via deep reinforcement learning[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 12(5): 4079-4089.
- [140] Cao D, Zhao J B, Hu W H, et al. Deep reinforcement learning enabled physical-model-free two-timescale voltage control method for active distribution systems[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2022, 13(1): 149-165.
- [141] Li H P, He H B. Learning to operate distribution networks with safe deep reinforcement learning[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2022, 13(3): 1860-1872.
- [142] Fan Z, Zhang W, Liu W X. Multi-agent deep reinforcement learning-based distributed optimal generation control of DC microgrids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2023, 14(5): 3337-3351.
- [143] Zhang Z, Zhang D, Qiu R C. Deep reinforcement learning for power system applications: An overview[J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2020, 6(1): 213-225.
- [144] 孙秋野, 杨凌霄, 张化光. 智慧能源——人工智能技术在电力系统中的应用与展望[J]. *控制与决策*, 2018, 33(5): 938-949.
(Sun Q Y, Yang L X, Zhang H G. Smart energy—Applications and prospects of artificial intelligence technology in power system[J]. *Control and Decision*, 2018, 33(5): 938-949.)
- [145] Zhang Q C, Lin M, Yang L T, et al. A double

- deep Q -learning model for energy-efficient edge scheduling[J]. IEEE Transactions on Services Computing, 2019, 12(5): 739-749.
- [146] Qiu C R, Hu Y, Chen Y, et al. Deep deterministic policy gradient (DDPG)-based energy harvesting wireless communications[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(5): 8577-8588.
- [147] Cao D, Zhao J B, Hu W H, et al. Data-driven multi-agent deep reinforcement learning for distribution system decentralized voltage control with high penetration of PVs[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(5): 4137-4150.
- [148] Nakabi T A, Toivanen P. Deep reinforcement learning for energy management in a microgrid with flexible demand[J]. Sustainable Energy, Grids and Networks, 2021, 25: 100413.
- [149] Chen P Z, Liu M C, Chen C X, et al. A battery management strategy in microgrid for personalized customer requirements[J]. Energy, 2019, 189: 116245.
- [150] 季颖, 王建辉. 基于深度强化学习的微电网在线优化调度[J]. 控制与决策, 2022, 37(7): 1675-1684.
(Ji Y, Wang J H. Online optimal scheduling of a microgrid based on deep reinforcement learning[J]. Control and Decision, 2022, 37(7): 1675-1684.)
- [151] Duan J J, Yi Z H, Shi D, et al. Reinforcement-learning-based optimal control of hybrid energy storage systems in hybrid AC-DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(9): 5355-5364.
- [152] Foruzan E, Soh L K, Asgarpoor S. Reinforcement learning approach for optimal distributed energy management in a microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(5): 5749-5758.
- [153] 王焘, 赵彬涛, 于智航, 等. 临近空间探空飞艇能源系统仿真技术研究[J]. 电源技术, 2022, 46(9): 1057-1061.
(Wang T, Zhao B T, Yu Z H, et al. Simulation technology of energy system of the near space airship[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2022, 46(9): 1057-1061.)

作者简介

张志成(1990—), 男, 博士后, 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;

李鹏(1993—), 男, 博士后, 从事Delta算子系统和有限频率分析的研究, E-mail: lipeng_2017@163.com;

左志强(1973—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 从事非线

性系统、鲁棒 H_∞ 控制、多智能体系统控制等研究, E-mail: zqzuo@tju.edu.cn;

王一晶(1976—), 女, 教授, 博士, 博士生导师, 从事非线性系统、切换系统、多智能体系统控制等研究, E-mail: yjwang@tju.edu.cn;

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;

倪旺(1989—), 男, 高级工程师, 博士, 从事新型电源技术的研究, E-mail: niwang19891226@163.com;

刘兴江(1965—), 男, 研究员级高级工程师, 博士, 从事电子材料、电池材料与电池设计等研究, E-mail: xjliu@nkllps.org.

科研团队简介

集群化能源系统研究团队, 现有教授3人, 副教授3人, 博士后3人, 博士、硕士研究生60余人. 团队负责人左志强教授获教育部新世纪优秀人才、天津市131创新人才、全球顶尖前10万科学家荣誉, 现任中国自动化学会理事, Journal of the Franklin Institute、《控制与决策》等期刊编委. 近3年发表SCI论文60余篇, EI论文20余篇, 获2021年度天津市科学技术进步一等奖. 实验室建有能源系统机器学习训练与推理平台、集群化能源系统分布式协同控制平台、锂电池高低温测试等多种实验平台. 现已成立天津市智能无人集群技术与系统重点实验室, 建设天津大学-工程硕士-智能电源系统研发与测试基地.

研究团队以国家重大需求为牵引, 围绕临近空间太阳能飞行器集群化能源系统开展研究, 重点开展能源系统能流调度与分布式协同抗扰控制、模型与数据驱动的能源系统故障检测以及基于深度强化学习的能量调度策略研究, 解决了能源系统能量调度与协同控制领域的瓶颈问题, 为我国临近空间太阳能飞行器连续跨昼夜飞行提供有力支撑.

在能源系统研发及产业化推广方面, 研究团队与中国科学院空天信息创新研究院、中国电子科技集团公司第十八研究所等单位紧密合作, 现已将研究成果应用于我国大型临近空间太阳能无人飞行器, 并服务于我国西藏地区以及罗斯海南极科考站可再生能源系统的开发应用, 填补了我国在极端环境以及偏远地区微电网供电领域的空白.