

文章编号: 1000-8055(2024)12-20220792-15

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220792

太阳能无人机电源系统综述

张 树¹, 刘 璇¹, 王 晨², 岳凤发¹, 管乐诗³, 王议锋²

(1. 中国民航大学 电子信息与自动化学院, 天津 300300;

2. 天津大学 电气自动化与信息工程学院, 天津 300072;

3. 哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 针对国内太阳能无人机系统性研究较少的问题, 从太阳能无人机的发展现状讨论, 按照电源系统的主要功能单元, 分别从太阳能电池板、能量存储系统、功率变换器等方面展开论述。总结了国内外具有代表性的相关研究成果, 发现太阳能无人机电源系统的性能是影响其持续作业的关键因素之一, 主要研究问题有: 提高光伏电池的转化效率及物理特性、提高储能单元能量密度与稳定性, 以及配备相应的能量管理系统。最后, 总结太阳能无人机电源系统的发展方向: 从高性能太阳能电池材料的研发, 到储能系统的多样性研究及环境适应性的提高, 再到大功率、高效率的功率变换器的设计和能量管理的智能化, 最终提高能量利用率及实现系统的小型化和轻质化。

关 键 词: 太阳能无人机; 无人机; 电源系统; 功率变换器; 太阳能电池

中图分类号: V19

文献标志码: A

Review of solar UAV power system

ZHANG Shu¹, LIU Xuan¹, WANG Chen², YUE Fengfa¹,

GUAN Yueshi³, WANG Yifeng²

(1. College of Electronic Information and Automation,

Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

2. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

3. School of Electrical Engineering and Automation,

Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In view of the lack of systematic research on solar unmanned aerial vehicles (UAV) in China, the development status of solar unmanned aerial vehicles was discussed from the aspects of solar panels, energy storage systems, power converters, etc., according to the main functional units of the power system. The representative research results at home and abroad were summarized. It was found that the performance of the solar UAV power system was one of the key factors affecting its continuous operation. The main research issues included: improving the conversion efficiency and physical characteristics of photovoltaic cells, improving the energy density and stability of energy storage units, and equipping the corresponding energy management system. Finally, the development direction of solar UAV power system was summarized: from the research and development of high-performance solar cell materials, to the research on the diversity of energy storage systems and the improvement of environmental adaptability, and then to the design of high-power and high-efficiency power converters and the intellectualization of

收稿日期: 2022-10-15

基金项目: 中国民航大学中央高校基金(3122019038)

作者简介: 张树(1988—), 男, 讲师、硕士生导师, 博士, 主要从事 LED 驱动器、高频 DC-DC 功率变换器和机载电源研究。

E-mail: zhangshu0503@163.com

引用格式: 张树, 刘璇, 王晨, 等. 太阳能无人机电源系统综述[J]. 航空动力学报, 2024, 39(12): 20220792. ZHANG Shu, LIU Xuan, WANG Chen, et al. Review of solar UAV power system[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(12): 20220792.

energy management, finally to improvement of the energy utilization rate and realization of the miniaturized and lightweight system.

Keywords: solar UAV; unmanned aerial vehicle; power system; power converter; solar battery

近年来,随着无人机的市场规模持续增长、新应用领域不断开拓、应用场景更加丰富,无人机种类也更加精细化,再加上太阳能、氢能等新能源也日益受到重视,太阳能无人机应运而生^[1-3]。太阳能无人机在白天依靠太阳能提供动力并储备能量,在无光照的夜晚释放储能维持飞机的运行。这种无人机具有超长航时、持久留空、超高空飞行的特点^[4-6]。借助这些优势,太阳能无人机可以在平流层飞行,有望能够代替人造卫星的大部分功能,如导航、天气预报、环境及灾害监测、互联网以及军事侦察等用途。由于太阳能无人机的成本更低,因此它具备卫星所不可比拟的成本优势^[7-8]。

为了保障太阳能无人机的运行,电源系统作为动力源,具有不可忽视的作用。太阳能无人机电源系统主要包括以下几个部分:太阳能电池板、能量存储系统、功率变换器等。太阳能电池板负责将太阳能转化为电能;能量存储系统为无人机夜间飞行提供能量;功率变换器作为“接口”,实现电能转换为负载供能。

现有的无人机综述文章,主要面向无人机的分类、应用领域以及能源管理等宏观层面,对于提升无人机动力系统等核心技术问题,论述较少,特别是针对太阳能无人机的电源系统,更是缺乏系统全面的讨论。本文按照不同功能单元,对太阳能电源系统进行详尽的介绍和阐述,从各国太阳能无人机的发展现状出发,分析技术上的差异和影响太阳能无人机电源性能的技术瓶颈,论述太阳能无人机电源系统的技术现状,最终给出对太阳能无人机电源系统的技术展望。

1 国内外太阳能无人机发展现状

太阳能无人机发展时间较短,与传统燃油无人机相比属于发展初期,总体相关技术还不是很成熟。太阳能无人机相比于其他无人机,具有能源清洁、续航时间显著提高的特点。为了减少太阳能电池功率密度较低对太阳能续航时间的限制,一般都会采用轻质材料减小飞机质量,目前世界上太阳能无人机的质量都在 2 000 kg 以下。而且,大型太阳能无人机飞行高度可以达到 20 km 以上,

预期持续飞行时间通常为几个月甚至几年,具有用作低空卫星的潜力^[9]。由于兼具卫星和飞机的优势,太阳能无人机已经成为各国航空器研究的热点方向。

1.1 太阳能无人机研发现状

目前美国和英国在太阳能无人机的研究领域首屈一指。其中美国国家航空航天局(NASA)研发的“Helios”系列无人机已经经历了四代的发展,无人机翼展从最初的 30.5 m 增加到了 75.3 m,飞行高度已经达到了近 30 km 的高空^[10],该系列无人机的研发为太阳能无人机的发展积累了大量经验。英国空客集团研发的“Zephyr”系列太阳能无人机曾一度创下此类航空器的最长飞行时间和飞行高度的纪录,2022 年,该系列最新的“Zephyr-8”无人机(如图 1 所示)在持续飞行 64 d 后突然坠毁,“Zephyr”无人机拥有充当“高空平台站”的潜力,该无人机可以在高海拔地区长时间停留,从而为下方的偏远地区提供宽带通信服务^[11]。西方国家由于起步较早,也投入了大量资金和精力,再加上不断的改进,在太阳能无人机研发领域已经拥有了强劲的实力。



图 1 空客“Zephyr-8”太阳能无人机

Fig. 1 Airbus “Zephyr-8” solar UAV

相比之下,我国对太阳能无人机的研发起步较晚,最初只在北京航空航天大学、南京航空航天大学等高校进行探索,近年来随着新能源技术的发展和政策的支持,各高校企业竞相投入相关研发。2017 年,由中国航天科技集团公司第十一研究院自主研发的“彩虹”太阳能无人机(如图 2 所示)试飞成功,标志着我国成为继英美之后第 3 个掌握临近空间太阳能无人机技术的国家^[12];南京航空航天大学研制出“灵翼”系列小型太阳能无人机,其中“灵翼 II”的机翼可以在飞行过程中发

生变形,在不同环境下提高飞行效率^[13];西北工业大学研制了“魅影”系列太阳能无人机,2019年,“魅影-12”实现了持续飞行 27 h 37 min,刷新了国内太阳能无人机的航时记录^[14],2022 年展出的“魅影-燕”是世界首架实现青藏高原 5 200 m 海拔环境下起飞并长时间飞行的太阳能无人机;2022 年 9 月,由中国航空工业集团有限公司第一飞机设计研究院研制的“启明星 50”大型太阳能无人机(如图 3 所示)试飞成功,该机型翼展达到了 50 m,可在 20 km 高空飞行,为航空工业大型太阳能无人机发展和型号立项奠定了坚实基础^[15]。

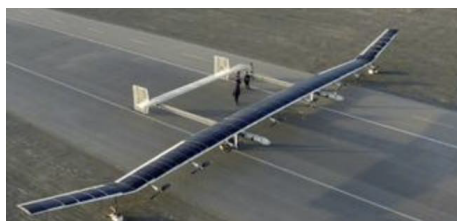


图 2 “彩虹”太阳能无人机
Fig. 2 “Rainbow” solar UAV



图 3 “启明星 50”太阳能无人机
Fig. 3 “Venus 50” solar UAV

1.2 太阳能无人机应用现状

太阳能无人机的功能应用主要分为两类^[16]:

1) 遥感测量类,包括监视与侦察、陆地沿海边境巡查、情报收集、矿物资源勘探、农业监测、自然灾害监测、土地管理等应用。传统的卫星遥感存在分辨率低、实时性差、数据缺失、易受云雾影响的缺点,而无人机离地面较近,可以弥补卫星的这些不足^[17]。

2) 通信连接类,包括移动通信、移动电话通信、宽带服务等通信类应用。太阳能无人机能够大范围覆盖区域,实现近地空域的“通信卫星”功能,维护成本及运行成本相比于卫星更低。由于电力供应不足、地形影响等问题,部分偏远地区无法实现通信,而且卫星通信存在速度、带宽以及定价问题,无法为偏远地区提供高效的服务,而太阳能无人机具有独特的优势,可以覆盖较大范围,且成本低廉,可以实现快速、经济的通信

服务^[18]。

除了以上的功能之外,太阳能无人机在军事应用中也有望实现高空预警、电子对抗、导航指挥等多种潜在的功能^[19]。

目前,绝大多数太阳能无人机在国内外尚处于技术研究和测试阶段,只有少数型号实现了技术应用。其中空客的 Zephyr-S^[20](如图 4 所示)已经完成了多次的试飞和应用测试,目前已经确定投产,主要应用于环境检测和军事通信。HAPS Mobile 公司研发的 SunGlider 太阳能无人机^[21]在 2020 年 9 月完成世界上首次携带 LTE(long term evolution)载荷,飞行在平流层,为地面提供 LTE 服务,并进行了高质量的视频通话。BAE 系统公司的 PHASA-35^[22]在 2020 年 2 月完成低空首飞,并测试了多项功能,目标是为侦察、监视和通信应用提供长期稳定的平台。谷歌的 Solara 50^[23](如图 5 所示)计划用作大气卫星,并规划了多种应用,包括气象监测、作物监测、搜索救援等应用。国内外主要太阳能无人机型号及性能参数如表 1^[24-27]、表 2 所示^[28-30]。



图 4 空客“Zephyr-S”太阳能无人机
Fig. 4 Airbus “Zephyr-S” solar UAV



图 5 谷歌“Solara 50”太阳能无人机
Fig. 5 Google “Solara 50” solar UAV

总之,随着新能源技术的发展,太阳能无人机无论是在各个领域还是民用领域都有广泛的应用前景。而太阳能无人机的稳定、高效运行,离不开电源系统的支撑、保障,突破太阳能电源系统关键技术问题,有助于推进太阳能无人机的正式应用。

表 1 国内外主要中/大型太阳能无人机^[24-27]

Table 1 Main medium/large solar UAVs at home and abroad^[24-27]

型号	国家	翼展/m	质量/kg	试验年份	持续飞行时间	太阳能电池最大输出功率/kW
Helios	美国	75.3	720	2003	24 h	40
Aquila	美国	43	453	2016	96 min	5
Zephyr-8	英国	25	75	2022	63 d	
Solara 50	美国	50	159	2015	5 年(目标值)	7
PHASA-35	英国	35	150	2023	1 年	
彩虹	中国	45	20(载荷)	2017	15 h	
启明星 50	中国	50		2022	26 min	
Sunglider	日本	78	68(载荷)	2020	20 h	

表 2 国内外主要小/微型太阳能无人机^[28-30]

Table 2 Main small/micro solar UAVs at home and abroad^[28-30]

型号	国家	翼展/m	质量/kg	试验年份	持续飞行时间/h	太阳能电池最大输出功率/W
SoLong	美国	4.75	12.8	2005	48	225
天空使者号	瑞士	3.2	2.6	2005	5	80
Sky-sailor	瑞士	3.2	2.4	2008	27	90
PumaAE	美国	2.79	5.9	2013	9	
AtlantikSolar	瑞士	5.65	6.8	2015	81.5	275
Owl	俄罗斯	9	12	2016	50	

2 太阳能无人机电源系统关键技术

太阳能作为唯一的能量来源,能量密度较低,必须高效地利用才能保证无人机的持续飞行和机载功能设备的正常运行。电源系统是太阳能无人机的重要系统,如图 6 所示,其主要包含太阳能电池、储能系统、功率变换器、电动机等重要部件。本节将分别从以上功能单元,讨论太阳能无人机电源系统的发展现状。

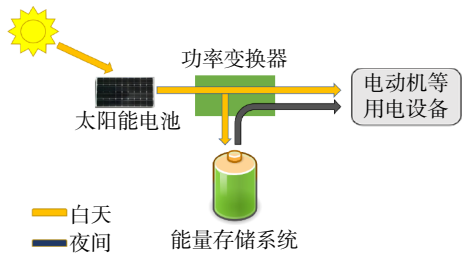


图 6 太阳能无人机电源系统示意图

Fig. 6 Schematic diagram of solar UAV power system

2.1 太阳能电池

太阳能无人机不携带燃料,能量完全来自太阳能,如果能够实现太阳能电池高转换效率,就可以实现航空器持续飞行。但是受电池板太阳能转化率低和机翼安装面积有限的制约,能为太阳能无人机提供的能量非常有限,因此这也成为太

阳能无人机亟待突破的技术瓶颈之一^[31]。太阳能无人机一般采用可弯曲、低密度、高效能太阳能电池作为发电源。由于高空环境的特殊,不仅对太阳能电池效率要求较高,而且需要有良好的物理特性,包括耐高低温变化、耐腐蚀等特点。因此,目前能够应用在太阳能无人机上的太阳能电池种类较少,主要以硅晶体电池和薄膜电池为主^[32]。表 3^[33-37]是几种太阳能电池的性能比较。

2.1.1 硅太阳能电池

硅太阳能电池主要有两种,分别为单晶硅太阳能电池和多晶硅太阳能电池^[38]。单晶硅电池效率较高,实验室效率可达 25%,产品效率在 16%~22% 之间,已广泛用于太阳能发电^[39]。单晶硅电池是较早研发的一类太阳能电池,目前单晶硅的结构和生产工艺已定型,该类电池曾应用于多种太阳能无人机,如空客的“Zephyr-6”、美国“Helios”系列无人机(如图 7 所示)。目前国内单晶硅单体厚度达到 150 mm,组件级转换效率达 17.5%。单晶硅太阳能电池对硅的纯度要求高达 99.999%,制作过程需要耗费大量硅材料,而且制造工艺复杂,成本较高^[40]。因此,主要面向航空航天领域,应用于人造卫星的太阳能电池板上。

表 3 太阳能电池性能指标^[33-37]
Table 3 Performance index of solar cell^[33-37]

电池种类	理论效率/%	产品效率/%	比功率/(W/kg)	优点	成本
单晶硅	24	14~19	455	转化率高、技术成熟、性能稳定	高
超薄柔性晶体硅异质结(SHJ)	26	20.5	1 190	低温制作、成品率高	低
非晶硅	25	8.5	557	柔性、生产速度快	低
砷化镓(GaAs)	38	31	2 467	转化率高、技术成熟、性能稳定	极高
铜铟硒(CIS)和铜铟镓硒(CIGS)	28	10~12	400	成本低、柔性、耐用	低



图 7 “Helios”硅太阳能电池
Fig. 7 “Helios” silicon solar cell

多晶硅太阳能电池的制备所用的硅量远少于单晶硅电池,可做成薄膜,在廉价基底上制备,而且效率衰减问题不明显,其成本远低于单晶硅电池^[41]。由于多晶硅内存在明显的晶粒界面,晶格错位等缺陷,转换效率一般为 17%~18%,其效率还比较低;其载流子迁移率、寿命和扩散长度等,与单晶硅太阳能电池相比都低很多。由于成本低廉,主要应用于太阳能灯具、太阳能建筑、光伏电站等,然而现阶段多晶硅电池转换效率尚不能满足太阳能无人机的功率需要^[42]。

2.1.2 薄膜电池

薄膜电池主要包含以下几种:硅基薄膜电池、碲化镉(CdTe)薄膜电池、铜铟镓硒(CIGS)薄膜电池、砷化镓(GaAs)薄膜电池和染料敏化太阳能电池(DSSC)等。薄膜电池可以做到很薄,质量面密度低,且附形能力强,满足柔性铺片的需求^[43]。

其中, GaAs 薄膜电池效率最高,实验室效率已达到 40% 以上^[44]。GaAs 电池由于成本较高,目前仅在卫星等航天器上有较多应用,尚未应用到太阳能无人机等低成本设备^[45]。GaAs 太阳能电池比硅电池效率更高,而且 GaAs 材料吸收光谱范围广且吸收效率高,因此, GaAs 仅需数微米厚就可制备高效的太阳能电池^[46]。近年来,随着制造工艺水平的提高和成本的降低, GaAs 开始逐渐地应用到太阳能无人机中,空客研制的“Zephyr-S”无人机便搭载了 GaAs 电池(如图 8 所示)。



图 8 “Zephyr-S”GaAs 电池
Fig. 8 “Zephyr-S” GaAs battery

铜铟硒(CIS)和铜铟镓硒(CIGS)^[46]薄膜太阳能电池具有效率高、稳定性好、成本低廉、可在柔性衬底上制作的特点^[47]。从 1976 年第 1 次 CIGS 电池制备到今天, CIGS 太阳能电池的转换效率从最初的 4.5% 达到了 23.35%^[48]。由于具有可在柔性衬底上制备这一特点, CIGS 可以应用在更多领域,例如太阳能可穿戴设备和太阳能飞行器等。随着研究的不断深入, CIGS 太阳能电池将具有广阔的应用前景^[49]。

2.1.3 单晶硅-薄膜异质结太阳能电池

将晶体硅电池的高效率与非晶体硅薄膜电池的低成本、柔性的优势结合起来,形成异质结太阳能电池结构。这种混合型太阳能电池,具有以下优点^[50]: ①制造工艺温度低,有助于大规模生产; ②可以减小硅片厚度,实现柔性设计; ③光电转换效率高; ④弱光性能强,提高转化效率; ⑤耐温特性好,适合多种工作环境^[51]。

例如,超薄柔性晶体硅异质结(SHJ)电池以超薄单晶硅作为基材制作,采用对称结构、异质结 PN 结设计和低温工艺制造,容易实现超薄、轻质、柔性的特点。2011 年 SHJ 相关技术引入中国,经过多年发展,目前 SHJ 电池已实现国产化,我国自主研发的彩虹太阳能无人机使用的是上海微系统与信息技术研究所研制的 SHJ 太阳能电池(如图 9 所示)^[52]。

非晶硅薄膜太阳能电池是新一代最具发展潜



图 9 “彩虹”太阳能无人机 SHJ 电池
Fig. 9 “Rainbow” solar UAV SHJ battery

力的太阳能电池之一,虽然非晶硅电池效率较低,但比功率更高,且生产耗能少,适用于铺片面积较大的机型,得益于柔性衬底制备技术,非晶硅电池的转换效率已经提高到了 10% 以上。空客的“Zephyr-8”搭载的便是柔性非晶硅太阳能电池。

2.2 能量存储系统

能量存储系统为太阳能无人机实现跨夜飞行提供了保证,其性能对太阳能无人机的续航时间起着决定性作用。高空低温低压的环境对储能电池十分不利,因此部分高能量密度电池目前无法应用在太阳能无人机上,当前已经应用在太阳能无人机上的储能电池有银锌电池、镉镍电池、氢镍电池、锂离子电池、锂硫电池、燃料电池等^[53],其中锂离子电池、锂硫电池、燃料电池等应用最多。除储能电池外,超级电容器也是充当后备电源的一种优势选择^[54]。

2.2.1 传统锂电池

锂离子电池是目前较为先进且性能优良的储能电池,最常用于手机、笔记本电脑和电动汽车,也正在成为太阳能无人机的首选电池^[55-56]。锂离子电池的优点在于其工作电压高,工作电压一般为 3.6 V;自放电小,月均放电率可以达到 10% 以下;加工方便,可以制作成多种形状^[57]。目前锂离子电池相关技术已经比较成熟,能量密度提升空间有限,而且其能量密度尚无法满足太阳能无人机昼夜不间断飞行的需要,而且不耐受过冲和过放,通常不会应用在大型无人机上。美国 Solong 无人机搭载了 5.6 kg 的锂电池,能量密度在 180~240 W·h/kg 之间,仅储能电池的质量就占到了总质量的 43%,可见锂离子电池在实际应用中并非最优储能方案^[58]。

锂硫电池的能量密度高于锂离子电池,理论上可以达到 2 600 W·h/kg,且能以大电流状态持续放电,为无人机提供足够的功率^[59]。2010 年,英国将锂硫电池应用在了“Zephyr-7”太阳能无人

机上,能量密度为 350 W·h/kg,该无人机完成了高度 21 km、持续 14 d 的飞行^[60]。虽然锂硫电池能量密度较高,但是锂硫电池目前还存在技术问题,锂硫电池充放电前后体积变化较大,导致其结构稳定性较差,易发生安全问题。

2.2.2 燃料电池

可再生燃料电池与常规电池不同,一般电池的容量取决于内部活性物容量,而燃料电池一般以氢气、甲醇、天然气等为燃料,作为负极,氧气作为正极,氧化剂和还原剂均由外部提供,理论上只要反应物不断输入就可以持续发电^[61-62]。燃料电池具有效率高、无污染、低噪声的优点,近几年燃料电池已经成为新能源汽车领域的研究热点^[63]。氢燃料电池是目前应用最广泛的燃料电池,其发电效率可以达到 65%~85%,能量密度高于锂电池,随着储氢技术的进步,其能量密度仍有较大提升空间^[64]。为满足 400 W·h/kg 以上能量密度的需求,NASA 的太阳神无人机搭载了 120 kW·h 的氢氧燃料电池^[65]。目前燃料电池尚处在研发阶段,以氢燃料电池为例,现阶段氢气的制备和存储技术还不能满足大规模生产的需要,而且生产成本高昂,维护也非常专业,一旦损坏,不能马上更换,只能返厂维修,因此推广受限。如今在全球脱碳的大背景下,燃料电池的发展成为极具优势的一环,政策支持力度也越来越大,发展前景明朗,未来将在航空领域取得更多突破^[66]。

如图 10 所示,燃料电池与锂电池相比能量密度较高,但功率密度较低,然而这两类电池性能均高于其他类型的电池,因此目前太阳能无人机仍以搭载这两类电池为主。

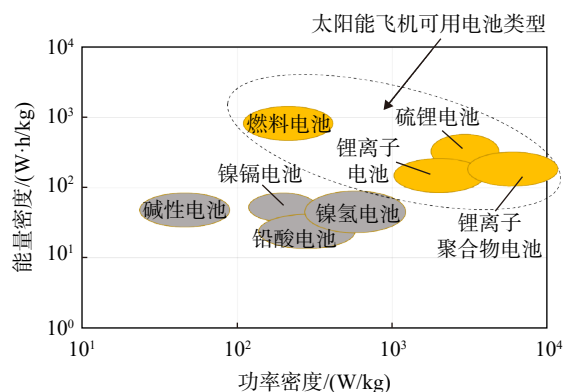


图 10 储能电池性能分布

Fig. 10 Performance distribution of energy storage battery

2.2.3 超级电容器

超级电容器也称为双电层电容器,其性能介

于电池与电容器之间,其充放电原理与电池不同,不需要发生化学反应,没有化学能到电能所产生的损耗,因此其充放电次数远高于电池^[67]。超级电容器有着高充放电速率,具有比燃料电池和锂电池更大的功率密度,最高可达到传统电池的 100 倍,但是能量密度很低,低于 $15 \text{ W}\cdot\text{h/kg}$,这导致其适用于短时大功率的应用,但不适合长时间的供能^[68]。

此外,相较于蓄电池,超级电容器的储能方式对环境无污染,被视为绿色能源。但是物理特性差是超级电容器最大的弱点,易受温度、振动、压力和湿度变化的影响,使其寿命大大减少^[69]。超级电容器的工作温度范围一般为 $-40\sim 65\text{ }^{\circ}\text{C}$,在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下的低温环境传统电池无法正常使用,而超级电容器依然能保持较好的性能,其常温寿命可以达到 10 年,但是在 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,超级电容器的寿命会缩短到两个月^[70]。此外,尽管超级电容器的研发成本有所下降,但单位能量成本还是远高于锂电池,除低温特性和高功率密度外没有其他优势。

超级电容器结合了蓄电池和电容的优点,随着能量密度的提高和成本的降低,将在新能源领域拥有广阔的应用前景。

虽然太阳能无人机以太阳能为动力,但怎样提高太阳能收集和转化效率,以及将太阳能进行存储,是保证太阳能无人机持续飞行的关键所在。除此以外,由于太阳能无人机长时间在太阳之下,电池的耐高温、抗拉伸等也面临挑战,这些问题都需要依靠更先进的电池技术出现。

2.3 功率变换器

太阳能无人机的能源来源于光照,利用太阳能光伏板将光能转换为电能。该供电方式的主要缺点之一是光伏面板的输出电压较低,无法直接用于无人机的用电设备。因此,无人机光伏发电系统需要一个具有高电压增益的转换器,以满足系统用电需求^[71]。在太阳能无人机输入端,一般采用 Boost 变换器升压,但通常单独的 Boost 变换器达不到太阳能无人机飞行所需的较高电压,不能提供足够的功率,所以太阳能无人机一般采用两个或两个以上 Boost 级联拓扑结构^[72]。为了提高太阳能的利用率,一般采用 MPPT(maximum power point tracking)控制方法,实现最大功率的追踪。采用级联电路结构,元器件较多,而且经过两次能量变换,能量损失较大,成本也较高,因

此近年来多种新型高效高增益变换器相继产生。

经过 Boost 变换器升压后一般将部分能量储存在以锂电池为主的储能系统中,进一步通过双向 DC-DC 变换器(bidirectional DC-DC converter, BDC),给机载导航、摄像机、通信系统等设备供电。双向 DC-DC 变换器实现能量双向传输,在实现相同功能的情况下,双向变换器比单向变换器更易实现模块化和轻量化。在光照充足时太阳能电池板经直流电网向负载和蓄电池供电,在夜间太阳能电池无法供电时,能量由蓄电池提供,经过变换流向直流总线,再由直流总线向负载供电^[73]。

目前 BDC 相关技术发展迅速,产品种类繁多,其拓扑结构按有无隔离可以分为隔离和非隔离两类,按基本单元拓展又可分为串联、并联、组合、复合型,其详细拓扑分类如图 11 所示,本节将从拓扑角度对 BDC 展开详细介绍。

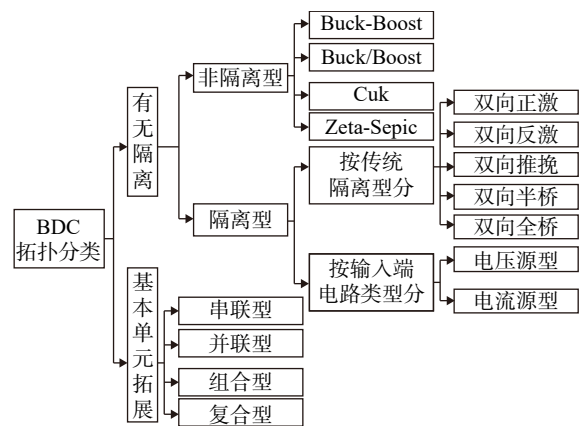


图 11 双向 DC-DC 变换器拓扑分类

Fig. 11 Topology classification of bidirectional DC-DC converters

2.3.1 非隔离型 BDC

非隔离型 BDC 具有结构简单、响应快、成本低、效率高的特点,但是通常不能提供较高的电压,适用于体积较小、功率较低的小型太阳能无人机。非隔离型 BDC 有 4 种类型: Buck/Boost、Buck-Boost、Cuk 和 Zeta-Sepic^[74-75]。

1) 双向 Buck/Boost 变换器以其开关元件少、拓扑结构简单、效率高等优点,在低压大电流应用场合得到广泛应用^[76],基本电路拓扑结构,如图 12 所示,图中 U 为输入输出电压, C 为电容, S 为开关, L 为电感, D 为 diode-D 二极管。

双向 Buck/Boost 变换器在原始的升压或降压变换器的基础上衍生而来,既可以实现升压或降压也可以交替工作,其转换效率一般在 90% 以上。

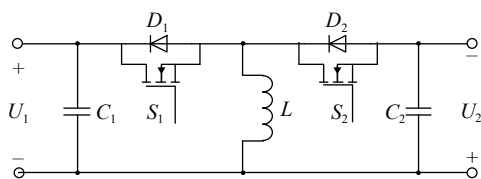


图 12 双向 Buck/Boost 变换器
Fig. 12 Bidirectional Buck/Boost converter

近年来,在软开关技术的加持下,其转换效率进一步提高, Venkit 等人^[77]提出了一种零电流开关(zero-current-switching, ZCS)双向升降压转换器,实现了两个主开关的 ZCS,升降压两种模式的工作效率都接近 99%。

2) 双向 Buck-Boost 变换器在单向 Buck-Boost 的基础上反并联二极管和功率管而构成,在单向传输中降压和升压都可以实现。双向 Buck-Boost 变换器是最常用的非隔变换器之一,在小功率工作场合应用最为广泛^[78]。

目前 Buck-Boost 变换器正在朝着高功率、低损耗的方向发展, Bhajana 等人^[79]提出了一种可以应用在大功率储能系统的非隔离型双向升降压 DC-DC 变换器(如图 13 所示),在 5 kW 输出功率和 75 kHz 开关频率下与传统 Buck-Boost 变换器相比,效率提高了 3%。

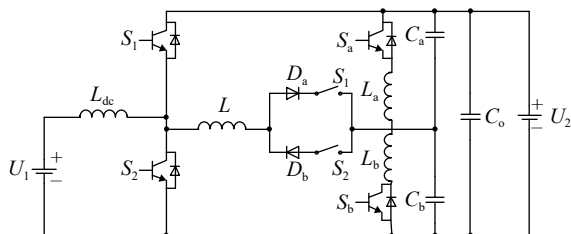


图 13 改进的双向 Buck-Boost 变换器
Fig. 13 Modified bidirectional Buck-Boost converter

四开关 Buck-Boost 变换器^[80]是光伏发电和储能应用的理想选择。组合半桥变换器(CHB)是基本的四开关双向 Buck-Boost 转换器(如图 14 所示),具有关于电容器的对称结构,输入端口和输出端口都有一个电感,可以降低输入输出电压纹波,但是由于电感的直流偏置电流,导致其效率较低。

级联 Buck-Boost 变换器(如图 15 所示)与 CHB 转换器相比体积更小,并且具有更高的效率,因为它仅使用一个电感器。双向 Buck-Boost 变换器在非连续导通模式下可以实现零电压开关,然而这会增加电流纹波,从而影响输出电压纹波。Lee 等人^[81]提出了一种双向升降压变换器,由传

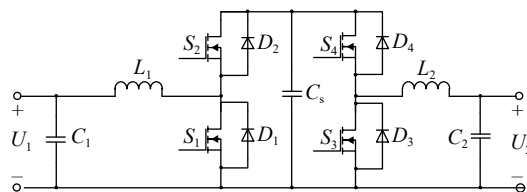


图 14 四开关双向 Buck-Boost 变换器
Fig. 14 Four switch bidirectional Buck-Boost converter

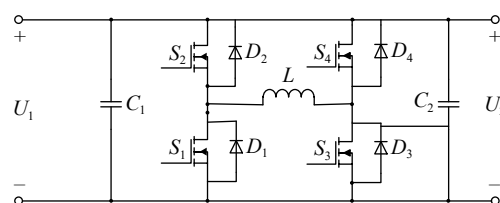


图 15 级联 Buck-Boost 变换器
Fig. 15 Cascade Buck-Boost converter

统级联 Buck-Boost 变换器和一个辅助电容器组成,4 个开关均在零电压开关(zero-voltage-switching, ZVS)条件下导通,如图 16 所示。所提出的变换器通过提供电流路径来降低输出电流纹波并提高效率,在 160 V 的输入电压、45 kHz 的开关频率、80~320 V 的输出电压和 16~160 W 的输出功率下测试得到了最高 98% 的效率。

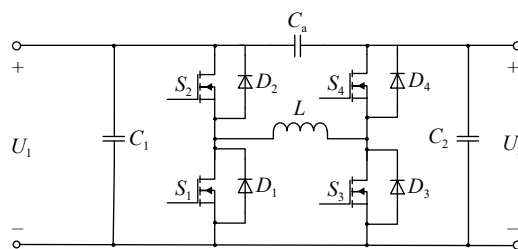


图 16 其他 Buck-Boost 变换器
Fig. 16 Other Buck-Boost converters

3) 通过在单向 Cuk 变换器电源开关和二极管的位置使用两个全控开关,可以将其转换为双向拓扑。双向 Cuk 变换器(如图 17 所示)与 Buck-Boost 变换器相比有一个明显的优点,其输入输出电流都是连续的,且输出电压和电流纹波比 Buck-Boost 变换器小得多,但是其拓扑结构较复杂,导致能量传输效率较低,通常用于低功率应用^[82]。

4) Zeta 和 Sepic 变换器之间具有对偶性,双向 Zeta-Sepic 变换器(如图 18 所示)工作在由高压到低压状态时,相当于 Zeta 变换器,反向工作时相当于 Sepic 变换器。该类变换器提供了一个电容器作为直流两侧之间的分隔。该拓扑结构包括两个开关和两个电感器。在短路或故障的情况

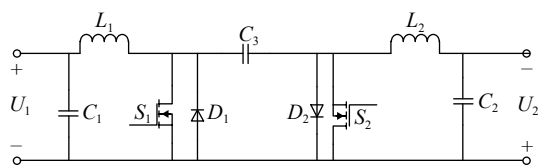


图 17 双向 Cuk 变换器

Fig. 17 Bidirectional Cuk converter

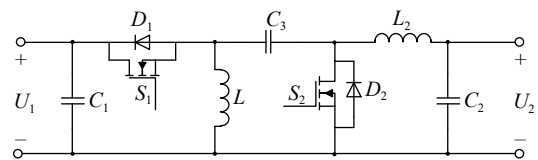


图 18 双向 Zeta-Sepic 变换器

Fig. 18 Bidirectional Zeta-Sepic converter

下, 两侧之间没有直流电流流动, 对电路有保护作用^[83]。该拓扑结构能量必须先通过电容 C_3 再传到负载, 损失较大, 因此也不适用于大功率工作场合。

从以上分析可知, 传统非隔离拓扑结构, 主要面向小功率应用场合, 更加适用于低压 28 V 总线, 转换为 5、3.3 V 的机载设备用电的应用场合。

2.3.2 隔离型 BDC

隔离型 BDC 在输入输出两侧之间设有高频变压器, 能够实现较高的增益, 还可以实现多路输入或多路输出, 适用于输入范围要求较宽电压和负载调节的应用。此外出于设备安全考虑, 特别是当用电设备采用 3.3、5 V 等低压供电时, 必须使用隔离型变换器。隔离型双向转换器是飞机、电动汽车、新能源等应用的理想选择。传统隔离型 BDC 有正激、反激、推挽、半桥和全桥以及这几类电路组合变换而衍生的变换器; 按输入源分类有电压源型和电流源型两类。

1) 双向正激变换器(如图 19 所示)可工作在正向、反向和交替状态, 且在交替工作模式下电流不会出现断续状态, 但是其输入电流是脉动的, 有较大尖峰出现, 对器件要求较高, 一般最大值为平均值的 4~5 倍。由于变压器处于单向励磁状态, 利用率较低, 此类变换器多用于中小功率电路^[84]。

2) 双向反激变换器(如图 20 所示)是两个工作在非连续导通模式下的反激变换器的集成, 其具有元件数量少、成本低、瞬态响应快以及输入和输出源之间有电气隔离等优点。但由于变压器漏感, 变换器开关损耗和电压应力较高, 因此通常仅应用于需要隔离的低功率应用^[85]。此外, 硬

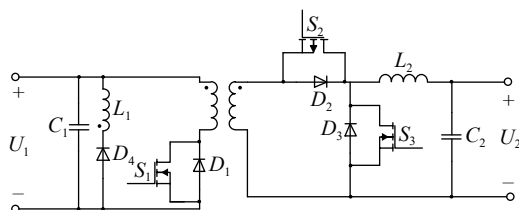


图 19 双向正激变换器

Fig. 19 Bidirectional forward converter

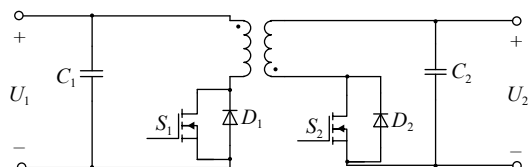


图 20 双向反激变换器

Fig. 20 Bidirectional flyback converter

开关转换器还存在电磁干扰高、效率低等诸多问题。

为了提高功率等级, 反激变换器通常与其他类型变换器组合, Hui 等人^[86]设计并实现了一种主要由反激变换器和升压/降压变换器组成的双向变换器, 实现了具有 4 个串联 12 V 铅酸电池和 400 V 直流总线的硬件原型, 升压模式下最大功率为 500 W, 可以满足小型无人机的功率需求。反激变换器通常引入软开关技术来降低损耗。Bijani 等人^[87]已经提出了一种新型辅助开关 ZVS 双向反激变换器, 如图 21 所示, 图中 GND 表示接地。该变换器两个主开关都达到了软开关条件, 与硬开关反激转换器相比, 效率提高了 5%。

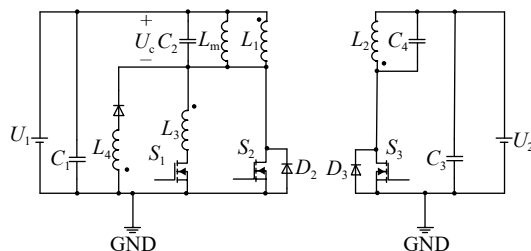


图 21 辅助开关型双向反激变换器

Fig. 21 Bidirectional flyback converter with auxiliary switch

3) 双向推挽式变换器(如图 22 所示)与单向推挽式转换器均使用多绕组变压器来转换能量^[88]。推挽式转换器的独特之处在于, 变压器初级侧的绕组中设有一对连接到输入电源线的开关, 这导致在每个半周期区间输出端都有连续的电流流动。其结构简单且能够适应高功率应用, 能量传输能力远大于反激变换器, 但是也存在变压器漏感, 开关需要承受较大的电压应力。

4) 双向半桥变换器(如图 23 所示)和全桥变

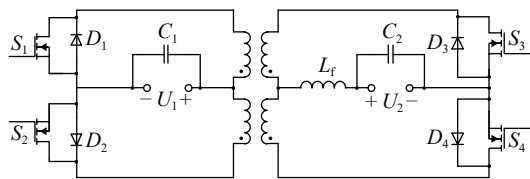


图 22 双向推挽变换器

Fig. 22 Bidirectional push-pull converter

换器是应用最多的一类变换器,此类变换器可靠性较高^[89]。桥式拓扑晶体管的电压应力等于直流输入电压,而不像推挽变换器那样高于输入电压。双向半桥变换器较之全桥变换器器件更少、成本更低,且仅通过移相控制就能实现零电压导通,经常用于电动汽车的辅助电源中^[90]。

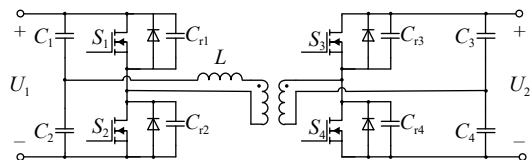


图 23 双向半桥变换器

Fig. 23 Bidirectional half-bridge converter

5) 双向全桥变换器(如图 24 所示)也被称为双有源桥变换器,其具有高功率转换、动态响应快、结构对称、开关管承受应力小、效率高等优点,是当前最受欢迎普遍应用的隔离型变换器之一。其拓扑结构中具有 8 个电源开关,使其适用于具有高电压增益比的大功率应用,例如航空飞机、电动汽车、直流配电等。

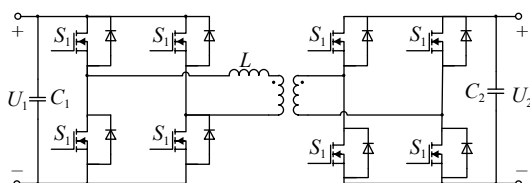


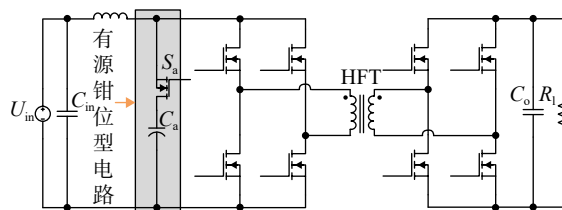
图 24 双向全桥变换器

Fig. 24 Bidirectional full-bridge converter

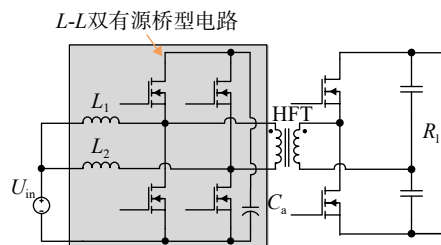
自 1988 年双有源桥 (dual-active-bridge converter, DAB) 的概念被提出以来,针对其相关技术的研究日益增多,研究内容主要集中在拓扑结构和控制方法等方面。DAB 转换器的传统相移调制策略称为单相移调制^[91](single phase shift, SPS)。这种移相调制方式伴随着大功率回流和大电流应力,当两侧电压比不等于 1 时,无法实现全范围的零电压切换。之后有学者提出了一种双相移调制^[92](dual phase shift, DPS)方法,可以有效消除大量的功率回流,降低电流应力,拓宽软开关范围,提高

转换器的效率。近几年又提出了三重相移调制^[93](triple phase shift, TPS),它进一步提高了转换器的整体性能,使控制更加灵活。

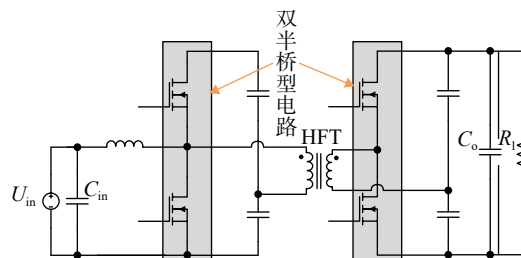
6) 电流源型 BDC 输入端串联有滤波电感来提供稳定的输入电流,通过调节开关占空比,可以实现 ZVS 条件。其主要结构有源钳位型、谐振型等(如图 25 所示,图中 R 为电阻, HFT 表示高频变压器),电流源型 DC-DC 变换器相比于电压



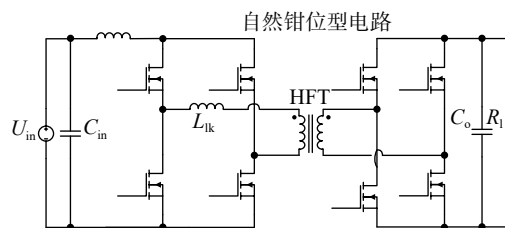
(a) 有源钳位型电路



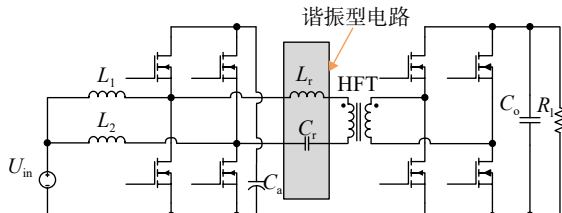
(b) L-L 双有源桥型电路



(c) 双半桥型电路



(d) 自然钳位型电路



(e) 谐振型电路

图 25 基本电流源型变换器拓扑结构

Fig. 25 Topologies of basic current-source converter

源型变换器,具有低电流纹波、负载可短路、高功率传输能力等优点,因此逐渐在高可靠性、大功率、电能质量要求高的应用场合得到了广泛的应用。

典型的有源钳位型电路一般采用全桥对称结构,功率传输等级高,软开关工作范围宽,但是电路成本也较高^[94]。*L-L* 双有源桥型电路^[95]不增加额外的钳位功率器件,成本相对低,但是无源电感、电容数量多,不利于系统功率密度的提高。同样的,双半桥型电路^[96]虽然成本低、无源器件少,但是限制了电路功率传输等级。在变压器原副边不对称的情况下,一般不利于模块化封装,增加了设计生产的难度。谐振型电流馈电变换器利用谐振电路解决了电压/电流尖峰和高开关损耗的问题,根据谐振类型的不同,可分为多种谐振型变换器,如 LC 型、CLC 型、LLC 型、LCC 型、CLLC 型等。该类电路缺点是谐振回路需要额外的电感和电容,而且这些无源元件的谐振电压和电流应力都比较大。表 4 列出了几种电流源型 BDC 的性能指标比较数据^[97](20 V 输入电压、400 V 输

出电压、2 kW 功率传输)。

电流源型 DC-DC 变换器不仅可以应用于民航飞机,对电能质量要求较高的许多微网应用场合,包括可再生能源系统,电动汽车电源系统、航空航天电源系统等,该变换器都能够满足应用要求,是未来大功率变换器的研究热点。

除以上基础变换器类型外,在实际应用中为满足更灵活的功能需求以及实现更大功率,通常会用到多种变换器组合级联,如串联型 BDC 可以解决开关应力大的问题,更适用于高增益场合。

非隔离型与隔离型变换器各自都有自身的优势以及不足。当前双向 DC-DC 变换器拓扑相关技术已趋于成熟,目前的研究重点是减小质量、体积、损耗和成本。

得益于低损耗的碳化硅(SiC)和氮化镓(GaN)等新材料器件以及相应控制方法的完善,变换器性能逐渐提高,高性能变换器的发展为光伏发电升压逆变提供了许多新思路、新方法,大大提高了太阳能无人机的能源利用率。

表 4 各类电流源型变换器性能指标

Table 4 Performance indexes of various current-source converters

参数	数值				
	有源钳位型	<i>L-L</i> 双有源桥型	双半桥型	自然钳位型	谐振型
开关管个数	8	6	4	8	8
电感个数	1	2	1	1	
电容	2	3	4	2	
损耗/W	33.15	23.19	13.42	7.28	12
功率密度/(W/cm ³)	4.26	3.89	5.08	5.84	3.93
效率/%	95.44	96.69	96.42	97.07	96.49

3 总结与展望

太阳能无人机因其无可比拟的优势,成为现今各国争相投入的新能源航空器之一。本文对太阳能无人机电源系统的关键技术及研究现状进行了综述,从太阳能电池、储能系统、功率变换器、电动机 4 个方面的关键技术展开分析。随着各种新技术的完善和发展,无人机电源系统的未来趋势将主要面向以下几个方面:

1) 成本更低、转换效率更高、物理性能更好的太阳能材料的研发和革新。融合硅基电池和薄膜电池的混合硅-薄膜材料,既兼顾成本又考虑转换效率,该材料将会成为太阳能电池板的重要研究方向。

2) 存储系统的多样性以及能源管理的智能化。随着航空器用电设备的增加,不同的飞行状态和飞行任务,对储能系统的供电稳定性和瞬时性能提出更高要求,混合储能系统将会更加复杂,因此能源管理的自动化智能化也是未来的研究方向。

3) 功率变换器的大功率、高效率、高功率密度需求。随着宽禁带半导体技术的发展,开关频率明显提高,有助于提高系统功率密度,对变换器功率等级和效率,提出更高的要求。

太阳能无人机随着应用需求的变化而不断更新发展,而电源系统是制约太阳能无人机性能的关键,本文的研究为相关科研学者和工程人员提

供了科研方向引导, 为开展后续工作打下一定的基础。

参考文献:

- [1] WEI Xin, YAO Peng, XIE Zexiao. Comprehensive optimization of energy storage and standoff tracking for solar-powered UAV[J]. *IEEE Systems Journal*, 2020, 14(4): 5133-5143.
- [2] RAJENDRAN P, SMITH H. Future trend analysis on the design and performance of solar-powered electric unmanned aerial vehicles[J]. *Advanced Materials Research*, 2015, 1125: 635-640.
- [3] SUN Yan, XU Dongfang, NG D W K, et al. Optimal 3D-trajectory design and resource allocation for solar-powered UAV communication systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2019, 67(6): 4281-4298.
- [4] 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 Weiguo, GUO Youguang, ZHANG Kai. Energy strategy on altitude profile for cycle flight of solar powered aircraft[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(3): 623429. (in Chinese)
- [5] 刘莉, 曹潇, 张晓辉, 等. 轻小型太阳能/氢能无人机发展综述[J]. *航空学报*, 2020, 41(3): 623474.
LIU Li, CAO Xiao, ZHANG Xiaohui, et al. Review of development of light and small scale solar/hydrogen powered unmanned aerial vehicles[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(3): 623474. (in Chinese)
- [6] 张秦岭, 黄建, 刘晓倩. 长航时太阳能无人机总体设计方法和分析[J]. *空军工程大学学报(自然科学版)*, 2014, 15(2): 12-15.
ZHANG Qinling, HUANG Jian, LIU Xiaoqian. General design method and analysis of long endurance solar powered UAV[J]. *Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition)*, 2014, 15(2): 12-15. (in Chinese)
- [7] KARABETSKY D, SINEGLAZOV V. Conceptual design of solar rechargeable airplane[C]//2019 IEEE 5th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments. Piscataway, US: IEEE, 2019: 17-20.
- [8] 刘刚, 王正平, 刘莉, 等. 考虑局部遮挡的太阳能无人机能源控制[J]. *航空学报*, 2020, 41(3): 623178.
LIU Gang, WANG Zhengping, LIU Li, et al. Energy control of solar powered UAVs considering partial shading condition[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(3): 623178. (in Chinese)
- [9] HERWITZ S R, DUNAGAN S, SULLIVAN D, et al. Solar-powered UAV mission for agricultural decision support[C]//Proceedings of 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Piscataway, US: IEEE, 2004: 1692-1694.
- [10] 祝彬, 陈笑南, 范桃英. 国外超高空长航时无人机发展分析[J]. *中国航天*, 2013(11): 28-32.
- [11] 温杰. “西风”太阳能无人机的改进与发展[J]. *国际航空*, 2017(10): 3.
WEN jie. Improvement and development of “Xifeng” solar UAV[J]. *International Aviation*, 2017(10): 3. (in Chinese)
- [12] 苑轩. 我国首款大型太阳能无人机完成两万米高空飞行[J]. *中国航天*, 2017(7): 33.
- [13] 昂海松. 太阳能无人机[J]. *电子产品世界*, 2015, 22(8): 24-26, 33.
ANG Haisong. Solar UAV[J]. *Electronics World*, 2015, 22(8): 24-26, 33. (in Chinese)
- [14] 崔劲, 胡茂杨, 赵顺. 临近空间太阳能无人机综合保障系统可靠性评估方法研究[J]. *产品可靠性报告*, 2024(9): 65-67.
CUI Jin, HU Maoyang, ZHAO Shun. Research on reliability evaluation method of integrated support system for solar unmanned aerial vehicle in near space[J]. *Reliability Reports*, 2024(9): 65-67. (in Chinese)
- [15] 国产大型太阳能无人机首飞成功[J]. *中国环境监察*, 2022(9): 6.
- [16] WU Jianfa, WANG Honglun, HUANG Yu, et al. Energy management strategy for solar-powered UAV long-endurance target tracking[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2019, 55(4): 1878-1891.
- [17] VOIGT S, KEMPER T, RIEDLINGER T, et al. Satellite image analysis for disaster and crisis-management support[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(6): 1520-1528.
- [18] AZARI M M, GERACI G, GARCIA-RODRIGUEZ A, et al. UAV-to-UAV communications in cellular networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(9): 6130-6144.
- [19] MARTIN A V I, SELVA D. Daphne: a virtual assistant for designing earth observation distributed spacecraft missions[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2019, 13: 30-48.
- [20] QINETI Q. Solar aircraft achieves longest unmanned flight[J]. *Reinforced Plastics*, 2010, 54(5): 9.
- [21] WU Mingjian, SHI Zhiwei, XIAO Tianhang, et al. Flight trajectory optimization of Sun-tracking solar aircraft under the constraint of mission region[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2021, 34(11): 140-153.
- [22] 王春阳, 周洲, 王睿. 基于最长航时的太阳能无人机操纵策略研究[J]. *西北工业大学学报*, 2020, 38(1): 75-83.
WANG Chunyang, ZHOU Zhou, WANG Rui. Study on operation strategy of solar-powered UAV based on longest endurance[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2020, 38(1): 75-83. (in Chinese)
- [23] SHIN K, HWANG H, AHN J. Mission analysis of solar UAV for high-altitude long-endurance flight[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2018, 31(3): 0000832.
- [24] 吴健发, 王宏伦, 黄宇. 大跨时空任务背景下的太阳能无人机任务规划技术研究进展[J]. *航空学报*, 2020, 41(3): 623414.
WU Jianfa, WANG Honglun, HUANG Yu. Research development of solar powered UAV mission planning technology in large-scale time and space spans[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(3): 623414. (in Chinese)
- [25] 张健, 张德虎. 高空长航时太阳能无人机总体设计要点分析[J]. *航空学报*, 2016, 37(增刊 1): 1-7.
ZHANG Jian, ZHANG Dehu. Essentials of configuration design of HALE solar-powered UAVs[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2016, 37(Suppl. 1): 1-7. (in Chinese)
- [26] 金鑫, 肖文波, 叶国敏, 等. 飞行状态对太阳能飞机中组件性能的影响[J]. *航空学报*, 2020, 41(10): 245-253.
JIN Xin, XIAO Wenbo, YE Guomin, et al. Effect of flight state parameters of solar aircraft on photovoltaic module performance[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(10): 245-253. (in Chinese)
- [27] 焦黎明, 徐伟强. 太阳能/氢能长航时无人机重量能量耦合分析[J]. *太阳能学报*, 2020, 41(2): 152-157.
JIAO Liming, XU Weiqiang. Weight energy coupling analysis for solar hydrogen long-endurance uav[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2020, 41(2): 152-157. (in Chinese)

- [28] OETTERSHAGEN P, MELZER A, MANTEL T, et al. Perpetual flight with a small solar-powered UAV: flight results, performance analysis and model validation[C]//2016 IEEE Aerospace Conference. Piscataway, US: IEEE, 2016: 1-8.
- [29] WU Mingjian, XIAO Tianhang, ANG Haisong, et al. Investigation of a morphing wing solar-powered unmanned aircraft with enlarged flight latitude[J]. *Journal of Aircraft*, 2017, 54(5): 1996-2004.
- [30] ZHU Lingzhi, ZHANG Shuning, WANG Xun, et al. Multilevel recognition of UAV-to-ground targets based on micro-doppler signatures and transfer learning of deep convolutional neural networks[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 70: 2503111.
- [31] 成珂, 王忠伟, 周洲. 太阳能飞机工作条件对太阳能电池性能的影响[J]. *西北工业大学学报*, 2012, 30(4): 535-540.
CHENG Ke, WANG Zhongwei, ZHOU Zhou. Exploring effects of solar-powered airplane operating conditions on solar cell performance[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2012, 30(4): 535-540. (in Chinese)
- [32] KAYES B M, ZHANG Ling, TWIST R, et al. Flexible thin-film tandem solar cells with >30% efficiency[J]. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2014, 4(2): 729-733.
- [33] HUSAIN A A F, HASAN W Z W, SHAFIE S, et al. A review of transparent solar photovoltaic technologies[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 94: 779-791.
- [34] 张传军, 褚君浩. 薄膜太阳能电池研究进展和挑战[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(9): 2524-2531.
ZHANG Chuanjun, CHU Junhao. Research progress and challenges of thin film solar cells[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(9): 2524-2531. (in Chinese)
- [35] 杨威宇, 徐国宁, 李兆杰, 等. 太阳电池在临近空间发电影响因素研究[J]. *太阳能学报*, 2021, 42(12): 476-485.
YANG Weiyu, XU Guoning, LI Zhaojie, et al. Influence factors of solar cell power generation in near space[J]. *Acta Energaie Solaris Sinica*, 2021, 42(12): 476-485. (in Chinese)
- [36] NAKAMURA J, ASANO N, HIEDA T, et al. Development of heterojunction back contact Si solar cells[J]. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2014, 4(6): 1491-1495.
- [37] PARIDA B, INIYAN S, GOIC R. A review of solar photovoltaic technologies[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(3): 1625-1636.
- [38] ESSIG S, BENICK J, SCHACHTNER M, et al. Wafer-bonded GaInP/GaAs//Si solar cells with 30% efficiency under concentrated sunlight[J]. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2015, 5(3): 977-981.
- [39] IZAM N S M N, ITAM Z, SING W L, et al. Sustainable development perspectives of solar energy technologies with focus on solar photovoltaic: a review[J]. *Energies*, 2022, 15(8): 2790.
- [40] 朱立宏, 孙国瑞, 呼文韬, 等. 太阳能无人机电源系统的关键技术与发展趋势[J]. *航空学报*, 2020, 41(3): 623503.
ZHU Lihong, SUN Guorui, HU Wentao, 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. (in Chinese)
- [41] 刘维一, 刘志永, 杨霞, 等. 铝衬底硅颗粒太阳能电池制备工艺研究[J]. *太阳能学报*, 2010, 31(6): 709-712.
LIU Weiyi, LIU Zhiyong, YANG Xia, et al. Research on the fabrication of silicon particle solar cells with aluminum substrate[J]. *Acta Energaie Solaris Sinica*, 2010, 31(6): 709-712. (in Chinese)
- [42] FU Ran, JAMES T L, WOODHOUSE M. Economic measurements of polysilicon for the photovoltaic industry: market competition and manufacturing competitiveness[J]. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2015, 5(2): 515-524.
- [43] 王子龙, 张华, 吴银龙, 等. 三结砷化镓聚光太阳能电池电学特性的研究与仿真[J]. *太阳能学报*, 2015, 36(5): 1156-1161.
WANG Zilong, ZHANG Hua, WU Yinlong, et al. Research and simulation of in ga p/in ga as/ge triple-junction solar cell under high concentration photovoltaic system[J]. *Acta Energaie Solaris Sinica*, 2015, 36(5): 1156-1161. (in Chinese)
- [44] REINHARD P, CHIRILĂ A, BLÖSCH P, et al. Review of progress toward 20% efficiency flexible CIGS solar cells and manufacturing issues of solar modules[J]. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2013, 3(1): 572-580.
- [45] 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 Dongli, ZHANG Liang, YANG Muqing, 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. (in Chinese)
- [46] TOPIĆ M, GEISTHARDT R M, SITES J R. Performance limits and status of single-junction solar cells with emphasis on CIGS[J]. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2015, 5(1): 360-365.
- [47] VALDES N H, JONES K J, OPILA R L, et al. Influence of Ga and Ag on the KF treatment chemistry for CIGS solar cells[J]. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2019, 9(6): 1846-1851.
- [48] 昌敏, 周洲, 郑志成. 太阳能飞机原理及总体参数敏感度分析[J]. *西北工业大学学报*, 2010, 28(5): 792-796.
CHANG Min, ZHOU Zhou, ZHENG Zhicheng. Flight principles of solar-powered airplane and sensitivity analysis of its conceptual parameters[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2010, 28(5): 792-796. (in Chinese)
- [49] 王冬晨, 宋笔锋, 王海峰, 等. 基于能量平衡的平流层飞艇推进系统建模与优化设计[J]. *航空动力学报*, 2020, 35(9): 1918-1926.
WANG Dongchen, SONG Bifeng, WANG Haifeng, et al. Modeling and optimal design of stratospheric airship propulsion system based on energy balance[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2020, 35(9): 1918-1926. (in Chinese)
- [50] AMKREUTZ D, HASCHKE J, KÜHNAPFEL S, et al. Silicon thin-film solar cells on glass with open-circuit voltages above 620 mV formed by liquid-phase crystallization[J]. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2014, 4(6): 1496-1501.
- [51] WONG S M, YU H Y, LI J S, et al. Si nanopillar array surface-textured thin-film solar cell with radial p-n junction[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2011, 32(2): 176-178.
- [52] DUAN Weiyuan, BIAN Jiantao, YU Jian, et al. Ultrathin crystalline silicon heterojunction solar cell integrated on silicon-on-insulator substrate[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2015, 62(4): 1113-1118.
- [53] 赵凯, 祝小平, 周洲. 太阳能飞机方案设计阶段建模与仿真[J]. *飞行力学*, 2011, 29(1): 13-16.
ZHAO Kai, ZHU Xiaoping, ZHOU Zhou. Modeling and simulation of solar-powered airplane for the conceptual design[J]. *Flight Dynamics*, 2011, 29(1): 13-16. (in Chinese)
- [54] 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, 870.
QU Peng, WANG Yin. Development status and prospect of solar power systems for UAVs[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2015, 39(4): 864-866, 870. (in Chinese)
- [55] DE S, NORTHROP P W C, RAMADESIGAN V, et al. Model-based simultaneous optimization of multiple design parameters for

- lithium-ion batteries for maximization of energy density[C]//2012 American Control Conference. Piscataway, US: IEEE, 2012: 4275-4280.
- [56] ABBE G, SMITH H. Technological development trends in Solar-powered Aircraft Systems[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 60: 770-783.
- [57] 武伟, 谢少军, 汤雨, 等. 基于 Buck 交—交斩波器的无功补偿器拓扑与控制方法设计[J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(5): 124-129.
- WU Wei, XIE Shaojun, TANG Yu, et al. Topology and control strategy design for buck AC-AC chopper based var compensators[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(5): 124-129. (in Chinese)
- [58] GONG Xianzhi, XIONG Rui, MI C C. Study of the characteristics of battery packs in electric vehicles with parallel-connected lithium-ion battery cells[C]//2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC. Piscataway, US: IEEE, 2014: 3218-3224.
- [59] FOTOUHI A, AUGER D J, PROPP K, et al. Lithium-sulfur battery state-of-charge observability analysis and estimation[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 33(7): 5847-5859.
- [60] 郝亮, 朱佳佳, 丁兵, 等. 电化学储能材料与技术研究进展[J]. *南京航空航天大学学报*, 2015, 47(5): 650-658.
- HAO Liang, ZHU Jiajia, DING Bing, et al. Research progress of materials and technology for electrochemical energy storage[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2015, 47(5): 650-658. (in Chinese)
- [61] 许世森, 张瑞云, 程健, 等. 电解制氢与高温燃料电池在电力行业的应用与发展[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(9): 2531-2537.
- XU Shisen, ZHANG Ruiyun, CHENG Jian, et al. Application and development of electrolytic hydrogen production and high temperature fuel cell in electric power industry[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(9): 2531-2537. (in Chinese)
- [62] 张晓辉, 刘莉, 戴月领, 等. 燃料电池无人机动力系统方案设计与试验[J]. *航空学报*, 2018, 39(8): 221874.
- ZHANG Xiaohui, LIU Li, DAI Yueling, et al. Design and test of propulsion system for fuel cell powered UAVs[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2018, 39(8): 221874. (in Chinese)
- [63] LAI J S, ELLIS M W. Fuel cell power systems and applications[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2017, 105(11): 2166-2190.
- [64] 金科, 阮新波, 杨孟雄, 等. 复合式燃料电池供电系统[J]. *电工技术学报*, 2008, 23(3): 92-98.
- JIN Ke, RUAN Xinbo, YANG Mengxiong, et al. Hybrid fuel cell power system[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2008, 23(3): 92-98. (in Chinese)
- [65] VELEV O. Regenerative fuel cell system for an unmanned solar powered aircraft[R]. AIAA2000-2873, 2000.
- [66] 张晓辉, 刘莉, 戴月领. 燃料电池无人机能源管理与飞行状态耦合[J]. *航空学报*, 2019, 40(7): 222793.
- ZHANG Xiaohui, LIU Li, DAI Yueling. Coupling effect of energy management and flight state for fuel cell powered UAVs[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2019, 40(7): 222793. (in Chinese)
- [67] 顾帅, 韦莉, 张逸成, 等. 超级电容器不一致性研究现状及展望[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(11): 2862-2869.
- GU Shuai, WEI Li, ZHANG Yicheng, et al. Review of nonuniformity research and analysis on supercapacitor[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(11): 2862-2869. (in Chinese)
- [68] Farhan A, A. Z, Srinivas R, et al. Impact of thermal radiative Carreau ternary hybrid nanofluid dynamics in solar aircraft with entropy generation: significance of energy in solar aircraft[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2023, 149(4): 1495-1513.
- [69] 王鹏, 王海松, 张建文, 等. 超级电容储能系统在电网电压不平衡风电系统中的协调控制[J]. *太阳能学报*, 2015, 36(12): 2937-2945.
- WANG Peng, WANG Haisong, ZHANG Jianwen, et al. Coordinated control of supercapacitor energy storage system used in wind power generation system under unbalanced grid voltage[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2015, 36(12): 2937-2945. (in Chinese)
- [70] 李艳, 刘树林, 王颖. 基于超级电容器的电网短路故障监测系统自供电电源研究[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(增刊 2): 569-576.
- LI Yan, LIU Shulin, WANG Ying. Research on self-powered power supply of short-circuit fault monitoring system applied in grid based on supercapacitor[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(Suppl.2): 569-576. (in Chinese)
- [71] RAHIMI R, HABIBI S, SHAMSI P, et al. A high step-up Z-source DC-DC converter for integration of photovoltaic panels into DC microgrid[C]//2021 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. Piscataway, US: IEEE, 2021: 1416-1420.
- [72] HUBER L, JOVANOVIĆ M M. A design approach for server power supplies for networking applications[C]//APEC 2000. Fifteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. Piscataway, US: IEEE, 2000: 1163-1169.
- [73] 孙孝峰, 申彦峰, 霍庆颖. PWM 加双移相控制双向 Buck-Boost 集成三端口 DC-DC 变换器[J]. *太阳能学报*, 2016, 37(5): 1180-1189.
- SUN Xiaofeng, SHEN Yanfeng, HUO Qingying. Bidirectional Buck-Boost integrated three-port DC-DC converter with PWM plus dual phase shift control[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2016, 37(5): 1180-1189. (in Chinese)
- [74] 李彦君, 张兴, 赵文广, 等. 基于拓展移相调制的双有源桥回流功率优化策略[J]. *太阳能学报*, 2022, 43(3): 216-222.
- LI Yanjun, ZHANG Xing, ZHAO Wenguang, et al. Optimized strategy of dual active bridge reflux power based on extended phase shift modulation[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2022, 43(3): 216-222. (in Chinese)
- [75] 蒋超, 杜贵平. 应用于车载充电器的双向 DC-DC 变换器综述[J]. *电源学报*, 2019, 17(4): 1-9.
- JIANG Chao, DU Guiping. Review of bidirectional DC-DC converters applied in on-board-charger[J]. *Journal of Power Supply*, 2019, 17(4): 1-9. (in Chinese)
- [76] 孙孝峰, 刘飞龙, 熊亮亮, 等. 双 Buck/Boost 集成双有源桥三端口 DC-DC 变换器[J]. *电工技术学报*, 2016, 31(22): 73-82.
- SUN Xiaofeng, LIU Feilong, XIONG Liangliang, et al. Dual Buck/Boost integrated dual active bridge three-port DC-DC converter[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(22): 73-82. (in Chinese)
- [77] VENKIT S M, ATHIRA P C. Solar powered ZCS bidirectional buck-boost converter used in battery energy storage systems[C]//2016 International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies. Piscataway, US: IEEE, 2016: 1-5.
- [78] 马晓爽, 梁晖, 丁庆, 等. 多端口双向 Buck-Boost 变换器研究[J]. *电力电子技术*, 2021, 55(5): 129-135.
- MA Xiaoshuang, LIANG Hui, DING Qing, et al. Research on multi-port bidirectional buck-boost converter[J]. *Power Electronics*, 2021, 55(5): 129-135. (in Chinese)
- [79] BHARJANA V V S K, DRABEK P. A novel ZCS non-isolated bidirectional buck-boost DC-DC converter for energy storage applica-

- tions[C]//2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics. Piscataway, US: IEEE, 2015: 1224-1229.
- [80] 吴岩, 王玮, 曾国宏, 等. 四开关 Buck-Boost 变换器的多模式模型预测控制策略[J]. 电工技术学报, 2022, 37(10): 2572-2583.
- WU Yan, WANG Wei, ZENG Guohong, et al. Multi-mode model predictive control strategy for the four-switch buck-boost converter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(10): 2572-2583. (in Chinese)
- [81] LEE H S, YUN J J. High-efficiency bidirectional buck-boost converter for photovoltaic and energy storage systems in a smart grid[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, 34(5): 4316-4328.
- [82] 郭佳. 双管耦合电感倍压单元 Cuk 变换器研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2022.
- GUO Jia. Research on high-gain cuk converter based on coupled inductance[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2022. (in Chinese)
- [83] KLOENNE A, SIGLE T. Bidirectional ZETA/SEPIC converter as battery charging system with high transfer ratio[C]//2017 19th European Conference on Power Electronics and Applications. Piscataway, US: IEEE, 2017: 1-7.
- [84] 彭银乔, 刘树林, 吴浩, 等. 正-反激组合变换器变压器的优化设计[J]. 电工技术学报, 2020, 35(增刊 2): 470-476.
- PENG Yinqiao, LIU Shulin, WU Hao, et al. Optimized design of transformer of forward-flyback converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(Suppl. 2): 470-476. (in Chinese)
- [85] KUMAR A, BHAT A H, AGARWAL P. Comparative analysis of dual active bridge isolated DC to DC converter with flyback converters for bidirectional energy transfer[C]//2017 Recent Developments in Control, Automation & Power Engineering. Piscataway, US: IEEE, 2017: 382-387.
- [86] HUI W R L, CHEN J F, LIM C H. Design and implementation of a bidirectional flyback boost/buck integrated converter[C]//2016 IEEE 2nd Annual Southern Power Electronics Conference. Piscataway, US: IEEE, 2016: 1-6.
- [87] BIJANI A, AMINI M R, FARZANEHFARD H, et al. A zero voltage switching PWM bidirectional flyback converter with one auxiliary switch[C]//20th Iranian Conference on Electrical Engineering. Piscataway, US: IEEE, 2012: 398-403.
- [88] NAGASHREE A N. Analytical comparison of dual active bridge converter with push pull converter for power transfer efficiency[C]//2019 Global Conference for Advancement in Technology. Piscataway, US: IEEE, 2019: 1-4.
- [89] 孟无忌, 张方华, 谢江华, 等. 双 Buck 半桥逆变器输入电容电压脉动的分析[J]. 航空学报, 2017, 38(1): 320054.
- MENG Wuji, ZHANG Fanghua, XIE Jianghua, et al. Analysis of voltage ripple on input capacitors in dual-Buck half bridge inverters [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(1): 320054. (in Chinese)
- [90] LI Haoyu, ZHAO Lei, XU Chuanyu, et al. A dual half-bridge phase-shifted converter with wide ZVZCS switching range[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 33(4): 2976-2985.
- [91] BAI Hua, NIE Ziling, MI C C. Experimental comparison of traditional phase-shift, dual-phase-shift, and model-based control of isolated bidirectional DC-DC converters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2010, 25(6): 1444-1449.
- [92] BAI Hua, MI C. Eliminate reactive power and increase system efficiency of isolated bidirectional dual-active-bridge DC-DC converters using novel dual-phase-shift control[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2008, 23(6): 2905-2914.
- [93] WU Kuiyuan, DE SILVA C W, DUNFORD W G. Stability analysis of isolated bidirectional dual active full-bridge DC-DC converter with triple phase-shift control[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2012, 27(4): 2007-2017.
- [94] 陶涛. 高频有源钳位反激变换器设计及控制策略研究[D]. 南京: 东南大学, 2021.
- TAO Tao. Research on design and control strategy of high frequency active clamp flyback converter[D]. Nanjing: Southeast University, 2021. (in Chinese)
- [95] XIAO Huafeng, XIE Shaojun. A ZVS bidirectional DC-DC converter with phase-shift plus PWM control scheme[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2008, 23(2): 813-823.
- [96] PENG F Z, LI Hui, SU Guijia, et al. A new ZVS bidirectional DC-DC converter for fuel cell and battery application[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2004, 19(1): 54-65.
- [97] PAN Xuewei, LI Hongqi, LIU Yitao, et al. An overview and comprehensive comparative evaluation of current-fed-isolated-bidirectional DC/DC converter[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(3): 2737-2763.

(编辑: 秦理曼)