

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2312844

基于 P&O 的恒流变脉冲充电方案研究^{*}

高会翔 曹 阳 彭小峰

(重庆理工大学电气与电子工程学院 重庆 400054)

摘 要: 针对无人机电池充电极化反应导致的耐用性问题,同时为了提高激光无线传能系统对无人机电池的充电速率,提出了一种 P&O 的恒流变脉冲充电方案。该方案首先使用 P&O 实现了对 GaAs 薄膜光电池最大功率点的跟踪,能够快速精准的追踪到最大功率点的电流电压,确保无人机在进行能量传输时的供能稳定性;之后结合 P&O 以及无人机锂电池的输出特性建立了基于 P&O 的恒流变脉冲充电方案,实现了对无人机锂电池极化反应的改善,从而提升无人机锂电池的耐用性和整体的充电速率。仿真结果表明,基于 P&O 的恒流变脉冲充电方案不仅可以提高无人机锂电池的耐用性,而且较常规的恒流、恒流恒压充电方法能够减少 289 s 的充电时间,充电效率提升 9.45%。

关键词: 激光无线能量传输;GaAs 薄膜光电池;最大功率点跟踪;恒流变脉冲充电

中图分类号: TK02 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 590.2060

Research on constant rheological pulse charging scheme based on P&O

Gao Huixiang Cao Yang Peng Xiaofeng

(School of Electrical and Electronic Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: Aiming at the durability problem caused by the polarization reaction of UAV battery charging, and in order to improve the charging rate of UAV battery by the laser wireless energy transmission system, a P&O constant current pulse charging scheme was proposed. This scheme first uses P&O to track the maximum power point of GaAs thin film photocells, which can quickly and accurately track the current and voltage at the maximum power point, ensuring the energy supply stability of the drone during energy transmission; Subsequently, a constant rheological pulse charging scheme based on P&O was established by combining the output characteristics of P&O and unmanned aerial vehicle lithium batteries, which improved the polarization reaction of unmanned aerial vehicle lithium batteries, thereby enhancing their durability and overall charging rate. The simulation results show that the constant flow pulse charging scheme based on P&O can not only improve the durability of drone lithium batteries, but also reduce the charging time by 289 seconds compared to conventional constant current and constant voltage charging methods, and improve the charging efficiency by 9.45%.

Keywords: laser wireless energy transmission; GaAs thin-film photocells; maximum power point tracking; constant rheological pulse charging

0 引 言

激光无线传输系统(laser wireless power transmission, LWPT)是指系统完全不需要电力输送线,而是采用激光供能的无线手段,向具体环境中需要完成工作的对象来提供能源支持,使其能够完成对应任务的能源输送系统。与传统的无线电波式、电磁耦合式等充电方式相比,激光无线传能技术很大程度上克服了距离限制,有针对性的解决电动无人机续航时间短的问题。近年来激光供能无人机系统正

在迅速发展,采用激光无线传能供能无人机,可大幅提升无人机的续航时间和航程距离,但由于有限的电池材料、重量,充电方式等各种问题的限制,电动无人机的续航问题和电池的耐用性问题一直是限制其执行任务的一项瓶颈,因此使用激光无线供能技术,可以极大的提高无人机的续航能力,再通过相关充电方法的改善也可以解决无人机电池的耐用性问题^[1-5]。

目前,在激光供能无人机这一领域中,考虑供能的同时又考虑到无人机锂电池耐用性的文献较少。潘松等^[6]提出

收稿日期:2023-02-17

^{*} 基金项目:重庆市科学技术局项目(cstc2019jcyj-msxmX0233、cstc2017shmsA40019)、重庆市教育委员会项目(KJQN201901125)、重庆市教委科学技术研究项目(KJQN201901103)、巴南区科学技术局项目(2019TJ07)资助

来一种激光供能无人机光伏电池的阵列重构方案,阵列重构后的光伏电池具有更高的输出功率、更低的功率损耗。刘晓光等^[7]分析推导激光供能无人机中串并联光伏组件与光照不均匀度的关系,通过优化电路连接方式提高了光伏接收器的效率。文献^[6-7]仅仅提高了光伏电池单方面的转换效率,未进一步对光伏电池输出后与无人机锂电池的相关研究相结合,存在一定局限性。Jha等^[8]采用恒压、恒流恒压、多级恒流法等充电方法为锂电池充电,并对其进行设计和仿真,以获得最佳充电算法。文献的最佳充电算法在充电速率上有较大优化但考虑锂电池充电速率的同时并未充分考虑对电池的耐用性是否存在影响。张东虞^[9]通过对锂电池充电曲线进行分析,得到对于充电过程中不同的电池容量有其相对应的电流大小与其匹配。文献阐述了在电池容量不同时,仅仅考虑充电电流对电池耐受率的影响,未考虑充电时间、电压、温度等对电池的影响。Wu等^[10]提出了一种电池寿命充电策略,实现了电池的快速灵活充电,并在仿真平台上通过建立相应的模型来验证,结果表明所提出的方法对提高电池的使用寿命具有明显的效果,并在一定程度上提高了充电效率。叶剑晓等^[11]提出了一种分阶段恒定电流搭配脉冲充电的方法,并对这种充电方法进行了仿真。实验表明:分段恒流结合脉冲充电方法可以很大程度上削弱电池极化效应,在不影响电池使用寿命的前提下,缩短电池充电时间,提高充电速率。王义等^[12]根据最优充电曲线,提出一种电车的多段恒流充电方法,与传统充电方法进行对比得出提出的充电方法可以均衡充电时间和温升,提升电池使用寿命。文献^[10-12]提出的相关充电策略通过优化充电方法完成对充电速率提高的同时又考虑到了锂电池使用寿命的问题。但这种充电方法设计较复杂且系统的运算量较大,对锂电池本身来说也存在一定的负担。

综上所述,考虑激光供能无人机中光伏电池输出后与无人机锂电池相结合的充电方法以及无人机锂电池耐用性相关方面还有很大的研究空间。本文围绕这两方面提出一种基于扰动观察法(perturbation and observation method, P&O)的恒流变脉冲充电方案,通过此方案来提高对无人机充电的整体速率,提升无人机锂电池的耐用性。本文做出的主要贡献可以总结如下:

1)为了分析光伏电池的输出特性,建立了能反映三结砷化镓(GaAs)薄膜光电池输出特性的P&O模型,同时对模型中相关参数值进行调整来提高对最大功率点电流电压追踪的速度和精度。

2)结合光伏阵列端的输出值以及无人机锂电池的输出特性建立了基于P&O的恒流变脉冲充电系统模型。在此系统模型中,分析了传统的恒流、恒流恒压充电法以及本文提出的恒流变脉冲充电法三种充电模式,分析不同充电方法下,锂电池的充电时间、荷电状态(state of charge, SOC)以及整个充电过程中的电流电压曲线情况。

1 系统方案介绍

1.1 LWPT系统模型

LWPT系统模型包括4个主要要素:激光器、砷化镓光伏阵列、无人机锂电池和无人机本身,并考虑了每个要素的条件以及四个主要因素之间的相互作用。图1显示了LWPT系统模型的总体设计。

由于每个组件之间相互影响并最终决定无人机的性能表现,故本文主要从考虑每个组件之间的交互作用入手,分析主要包括:

1)激光器与光伏电池之间的相互作用。这里主要考虑最大功率点搜索(maximum power point tracking, MPPT)算法与其追踪精度。

2)光伏电池与附着在无人机上的电池之间的相互作用。这里主要考虑充电方法的影响。

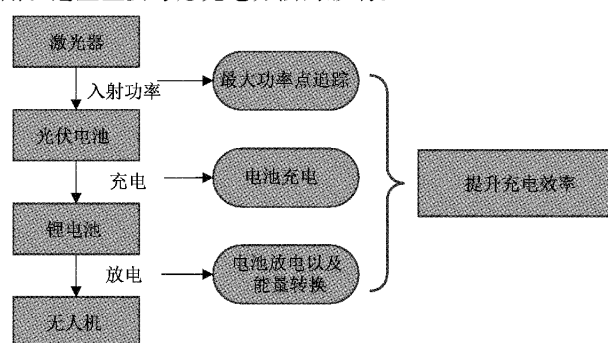


图1 LWPT系统总体模型

1.2 最大功率搜索算法及实现

光伏电池可以将收集到的光能进行处理进而转化成为无人机提供动力的电能,而MPPT算法可以忽略一般的影响因素,使输出功率在最大功率点附近实现稳定,能够最大程度上利用光伏电池的特性,制造出更多的电量^[13]。

为解决传统的MPPT算法误判、振荡以及追踪速度慢的问题。这里使用P&O来进行最大功率点跟踪,其原理为对工作中光伏阵列的输出功率进行测量,在测量时,对刚开始的输出电压上加上一个很小的扰动,并与上一时刻所测量的输出功率结果来进行对比,如果经过对比之后输出功率大于上一时刻的输出功率,下一阶段就沿着原本正确的扰动方向持续设置扰动,反之就改变原来的扰动方向^[14],具体流程如图2。

由于光伏电池是附着在无人机上的,所以实际应用中应根据无人机的大小以及光伏电池材料的质量与面积和其输出特性,选择对应的相关参数。正常的光伏电池材料并不能同时满足电池面积与质量较小且输出功率较大的条件,这里选择光电转换效率较高,面积以及质量也相对较小的GaAs薄膜光电池。由砷化镓制成的光伏电池禁带宽度要比常规硅质的光伏电池宽,所以其光电转换效率较常规硅质光伏电池高,耐温性也要比一般的硅质电池高,但比较脆,一般制成砷化镓薄膜覆于物体表面上^[15-16]。

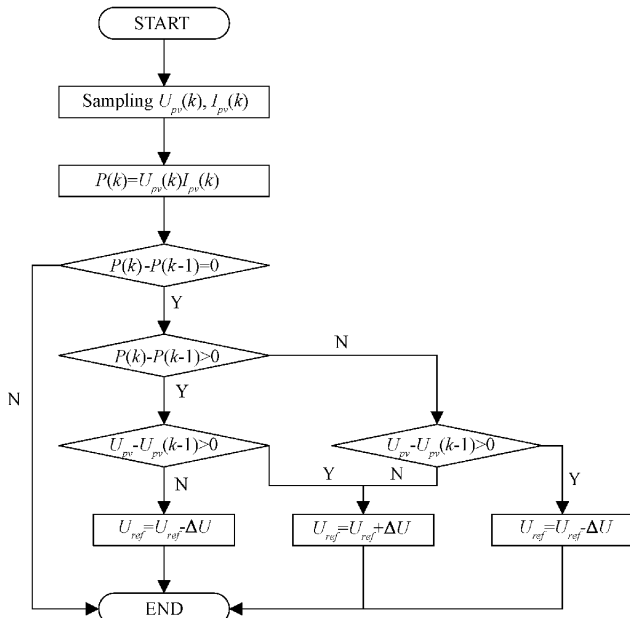


图 2 P&O 算法流程图

P&O 算法模型在 MATLAB 中选择合适参数范围内的模块搭建,这里选择 Buck-Boost 电路来实现最大功率点追踪。Buck-Boost 电路为升降压斩波电路,其输出电压的工作范围较大,但输出电压的极性与输入电压相反。

图 3(a)、(b) 表示金属氧化物半导体 (metal oxide semiconductor field effect transistor, MOSFET) 管在不同的开关状态下会有对应的拓扑结构(虚线区域为导通区域,箭头代表电流方向):

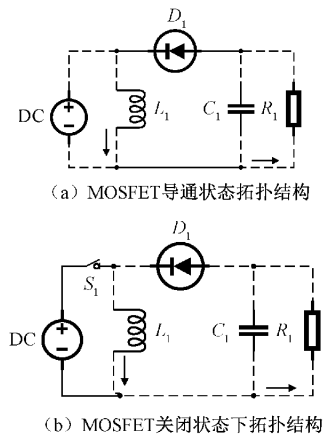


图 3 MOSFET 等效电路图

Buck-Boost 电路中的电容和电感的取值由下面两个公式来决定:

$$L = \frac{V_k DT_s}{\Delta I_L} \quad (1)$$

$$C = \frac{DI_0 T_s}{\Delta V} \quad (2)$$

I_0 是输出电流; $T = \frac{1}{f_s}$ 为周期时间; f_s 为开关频率; V_k 为

输入电压; ΔV 为输出电压的纹波电压; D 为占空比; ΔI_L 是电感纹波电流。

通过式(1)、(2)可以确定 ΔI_L 、和开关周期 T , 开关频率 f_s , 所以可以根据输出电压、输出电流的具体需求计算对应的电感电容值, 具体参数如表 1。

表 1 BUCK-BOOST 主电路参数值

参数	值
$C_1/\mu\text{F}$	20
$L_1/\mu\text{H}$	1
R/Ω	1

1.3 基于 P&O 的恒流变脉冲充电方案

无人机锂电池充电电路模块采用一种快速充电法—恒流变脉冲充电法, 可以提高锂电池的充电速率以及减小电池的极化现象, 充电过程示意图如图 4 所示。

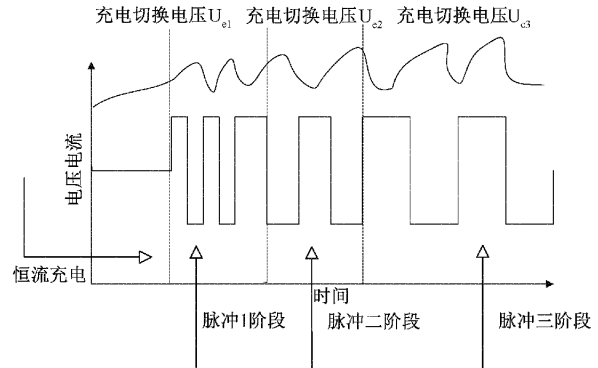


图 4 恒流变脉冲充电曲线

基于 P&O 的恒流变脉冲充电方案的充电过程分为恒流充电和变脉冲充电两个阶段。首先, 在第一阶段首先对锂电池进行恒流充电, 当锂电池端电压达到预设值后, 切换充电状态, 进入变脉冲充电的第二阶段, 由于在充电过程中, 锂电池最大可接受充电电流逐渐减小, 因此为了使充电电流接近于锂电池最大可接受充电电流, 在变脉冲充电阶段中将不断降低脉冲的占空比来降低充电电流。相比于常规的充电方法, 恒流变脉冲充电法在充电过程中采用不同的方式减少了极化反应对锂电池的影响, 因此可以使得锂电池能够在较大的充电电流下充电, 极大地提高了充电速度, 并最小程度减小了对电池寿命的影响。

在本文选择 3 S 系列型号为 XT60 的航模锂电池作为锂电池充电模型研究, 参数如表 2 所示。

在第一个充电阶段选择用 6.6 A 的恒定电流对无人机航模锂电池进行标准电流充电, 当充入的 SOC 值到达预设值后切换充电方式为脉冲式充电。选取电流幅值为 10, 占空比分别为 50%、60%、70% 的脉冲对可控的电流源进行控制, 不同占空比脉冲会根据无人机航模锂电池 SOC 值的变化自动切换, 之后通过不断调整切换电压和脉冲电流的占空比, 得到所用充电时间最少的切换电压和脉冲电流的占空比。

表2 锂电池充电模型参数

参数设置	值
电池容量	3 300 mah
额定电压	11.1 V
截止电压	16.8 V
恒流充电电流	6.6 A(2C)
最大充电电流	16.5 A(5C)
脉冲阶段电流幅值	10 A
初始电池温度	20 °C

规格书中不同容量的无人机锂电池建议充电电流不同,所以设定的充电电流幅值不同。在仿真中通过调节不同的占空比和充电截止电压来使充电时间以及锂电池荷电状态达到最优。

2 仿真结果及讨论

本文在 MATLAB/Simulink 的仿真环境下搭建了激光供能无人机的能量系统,并通过搭建的相关模型分析证明了仿真结果。系统输出的仿真结果通过 MPPT 模块,锂电池充电模块两方面详细讨论。

2.1 MPPT 算法仿真结果

该模型中的激光光伏阵列是基于用户自己所使用的光伏材料参数自行设置的,本文对一个单独的砷化镓光伏模块进行研究。以 InGaP/GaAs/Ge 型三结砷化镓光伏电池为研究对象,其可承受高达 500 倍太阳光当量的激光入射,单独模块的有效电池面积为 1 800 mm²。该光伏电池以入射功率为 1 000 W/m² 条件下测得的参数为参考值,最大功率点电压为 2.22 V,最大功率点电流为 12.0 mA,开路电压为 2.49 V,短路电流为 12.78 mA,模块温度设置为 25 °C。计算出模块入射功率为 10 000 W/m²、20 000 W/m²、30 000 W/m²、40 000 W/m² 下的最大功率追踪效果。

这里为了验证激光入射功率发生突变时以及不同激光入射功率下扰动观察法的追踪效果,将入射的激光功率密度在 Simulink 中由阶跃响应设置不同的阶跃值呈现出来。由图 5、6 可以看出每种激光功率基本可以完成跟踪,在激光功率密度突然增加时可以快速完成跟踪。启动时完成追踪的时间用时较长,但时长小于 1.2 s,激光功率密度有极大突变时追踪时间也小于 0.2 s。

为了研究 P&O 法不同时间段的工作精度进行了以下仿真,图 7(a)~(c)分别为不同时间段不同激光功率下的扰动范围,可知激光功率变大时扰动范围较大,其中图 7(a)表示最小扰动范围为 0.005 W,其总功率占比为 1.56%。图 7(b)为中间时间段的扰动范围约为 0.018 W,其总功率占比为 2.64%。图 7(c)表示最大扰动范围为 0.035 W,其总功率占比为 1.69%。由以上数据可知 P&O 法最大功率点搜索算法在不同激光功率密度下保证正常工作的同时精度也较高,追踪也较快,保证了最大功率点搜索的精准性。

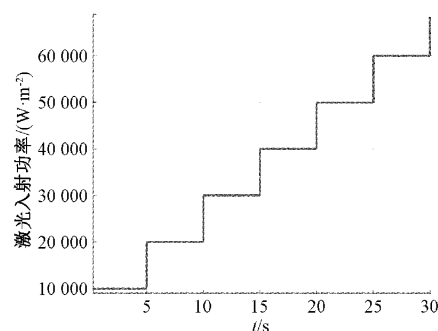


图5 不同时间的激光功率密度

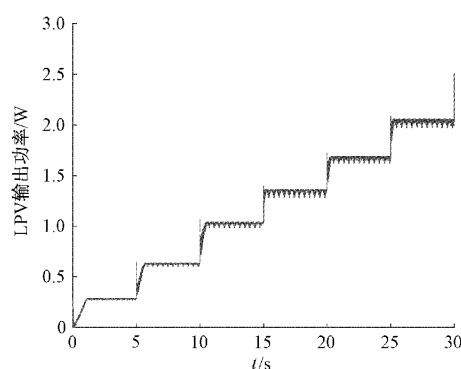


图6 不同时间光伏阵列输出功率

从图 8 知 InGaP/GaAs/Ge 型三结砷化镓光伏电池在不同的激光功率密度下其转换效率变化幅度整体较小,保持在 1.2%~2% 的变化幅度,保证了最大功率点搜索的有效性。

2.2 基于 P&O 的恒流变脉冲充电模块仿真结果

锂电池的恒流变脉冲充电第一阶段是按照 MPPT 追踪到的电流经调整后,进行恒流充电,之后通过不同占空比的脉冲电流,具体根据 SOC 变化的大小来判断,在每次达到预设的 SOC 值时依次增大占空比的方式来对锂电池充电。在 MATLAB/Simulink 中分别搭建基于 P&O 的恒流、恒流恒压、恒流变脉冲 3 种充电模型,所用的锂电池为常规的无人机航模锂电池,选用 Simulink 中元件库中的锂电池模型,具体型号和参数在上面已给出。

仿真环境参数设置如表 3 所示。

为了更好的凸显基于 P&O 的恒流变脉冲充电法的相关优势,图 9、10 为基于 P&O 下的常规充电方法包括恒流充电法和恒流恒压充电法的充电过程,由图 9 可知,恒流充电因为其一直保持恒定电流充电,SOC 曲线一直是线性状态,直到 3 126 s 电池充满为止,但是采用此方法在 SOC 充满之后锂电池的端电压会大幅上升,持续到充电结束,对锂电池会造成损伤,极大影响锂电池寿命。

由图 10 中可知,恒流恒压充电第一阶段采用恒流对锂电池进行充电,恒流充电阶段,首先将可控电流源与锂电池连接,同时通过 Switch 开关将可控电压源与锂电池断开,当锂电池端电压达到一定预定值后,通过 Switch 开关将可控电流源断开,并将可控电压源与锂电池连接,充电进入第 2 阶段,第 1 阶段的持续时间约为 1 181 s,充入的 SOC 量为

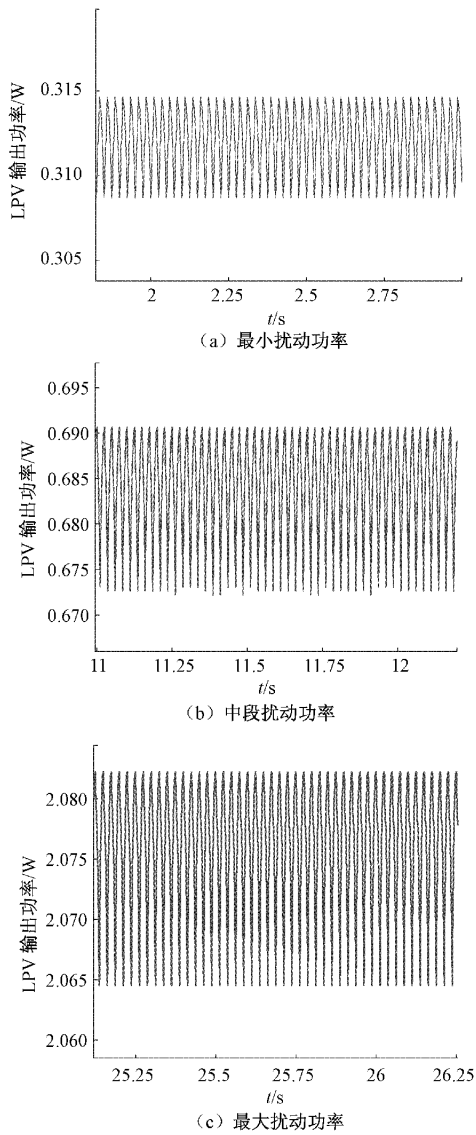


图 7 部分不同激光功率下的扰动范围

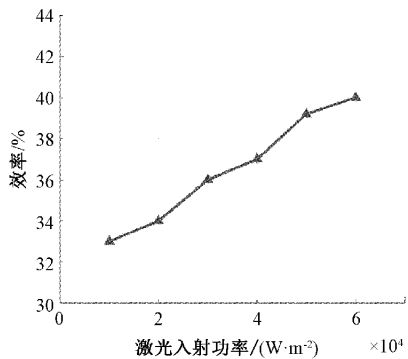


图 8 不同激光功率密度下激光光伏阵列的转换效率图

60.39%左右,第 2 阶段采用恒压对锂电池进行充电,恒压充电过程中,充电电压为锂电池截止电压,直到锂电池充电结束,锂电池在 2 913 s 时充电结束,最终的充入量为 99.16%。

本文提出的基于 P&O 的恒流变脉冲的快速充电法示意图如图 11 所示,由图 11 可知,在恒流阶段,电流持续以

表 3 仿真环境参数设置

参数设置	值
充电额定电压	11.1 V
充电截止电压	16.8 V
锂电池初始 SOC	0%
设定仿真时间	4 000 s
开关频率	1 000 Hz
锂电池标准容量	3 300 mah
初始电池温度	20 °C

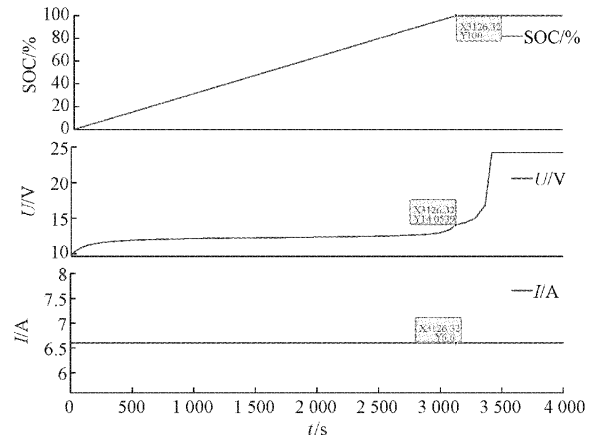


图 9 恒流充电过程效果

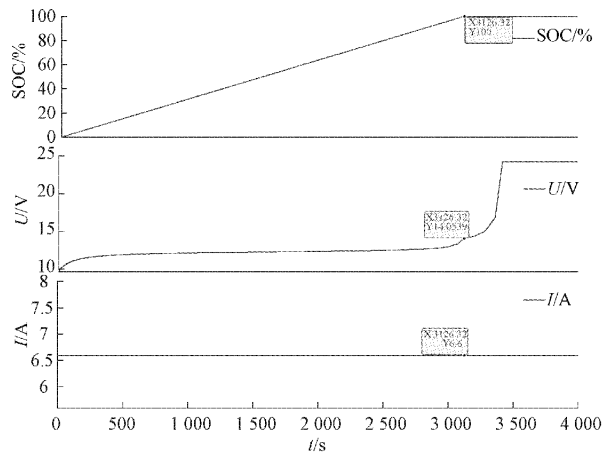


图 10 恒流恒压充电过程效果

6.6 A 的大小工作了大约 898 s,充入的 SOC 量约为 50.49%,在脉冲第一阶段,第一次达到截止电压 16.8 V 后开始以电流幅值为 10 A、占空比为 50%的脉冲电流对锂电池进行充电,脉冲第二阶段同样以电流幅值为 10 A、占空比为 60%的脉冲电流充电到 1 597.5 s,SOC 充入量约为 75%,脉冲第三阶段以电流幅值为 10 A,占空比为 70%的脉冲电流到 SOC 充入量为 99.78%,时间为 2 731 s,锂电池 SOC 状态保持在 99.78%不变,充电电流强行置零,锂电池端电压逐渐恢复到实际电压值,完成设定充电过程。由于充电周期设置较长,结束恒流充电后的变脉冲电流电压曲线生成的图像为区域状态呈现,图中每张小图的右下方为分别

为脉冲充电时的SOC、电压、电流放大图,放大图中的电流电压曲线与理想的恒流变脉冲电流电压曲线基本一致。

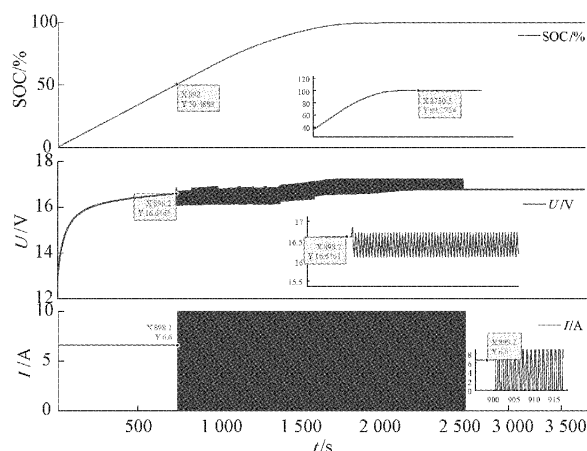


图 11 恒流变脉冲效果图

本文通过两种方式比较 3 种充电方法的优越性:1) 相同的充电时间来比较 3 种方法充入的 SOC 值的大小;2) 相同的 SOC 比较 3 种方法所用时间多少。

这里选择相同的电池型号 XT60(3 S),相同的电池容量(3 300 mah),来进行仿真,由图 12 可知,当 3 种充电方

法的 SOC 均为 99%时,基于 P&O 的恒流充电法、恒流恒压充电法、恒流变脉冲充电法分别用时 3 095 s、2 669 s、2 190 s;当 3 种充电方法用时均为 2 000 s 时,基于 P&O 的恒流充电法、恒流恒压充电法、恒流变脉冲充电法充入的 SOC 量分别为 63.97%、87.25%、96.48%。所以得出:当 3 种充电方法的 SOC 均为 99%时,基于 P&O 的恒流变脉冲充电法用时最少,其次是基于 P&O 的恒流恒压法,用时最多的为基于 P&O 的恒流法;当 3 种充电方法的充电时间均为 2 000 s 时,基于 P&O 的恒流变脉冲充入的 SOC 最多,其次是基于 P&O 的恒流恒压充电法,最后是基于 P&O 的恒流法。可知基于 P&O 的恒流变脉冲充电法无论是在充电速度还是在充入量上面均优于其他两种充电方法。

表 4 为 3 种不同充满方法下电池的温升情况(初始电池温度为 20 °C),图 13 为 3 种充电方法的温升效果图对比,由图可知在充电开始到结束阶段基于 P&O 的恒流充电法电池的温升直线上升,其余两种充电方法电池温升较慢,特别是本文所提出的基于 P&O 的恒流变脉冲充电方法在 2 731 s 的充电时间内温升只有 8.69 °C,可以极大削减锂电池的极化效应延长锂电池的使用寿命,对锂电池的寿命保护以及整体充电速率来说较优。

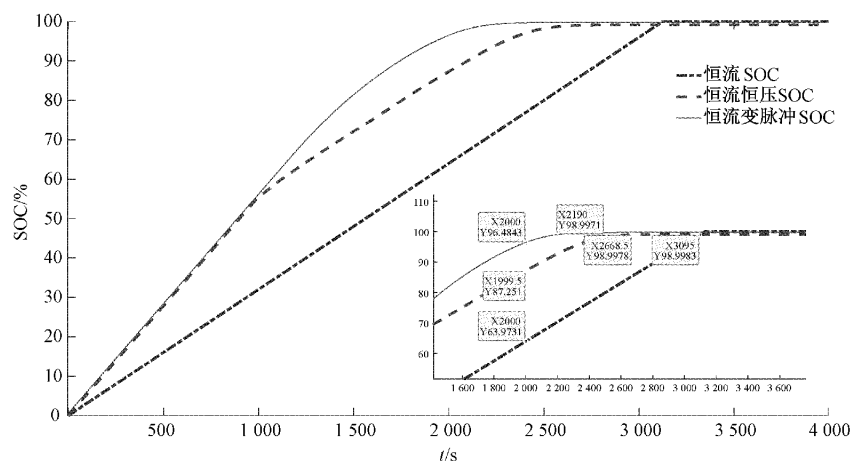


图 12 3 种充电方法 SOC 效果图

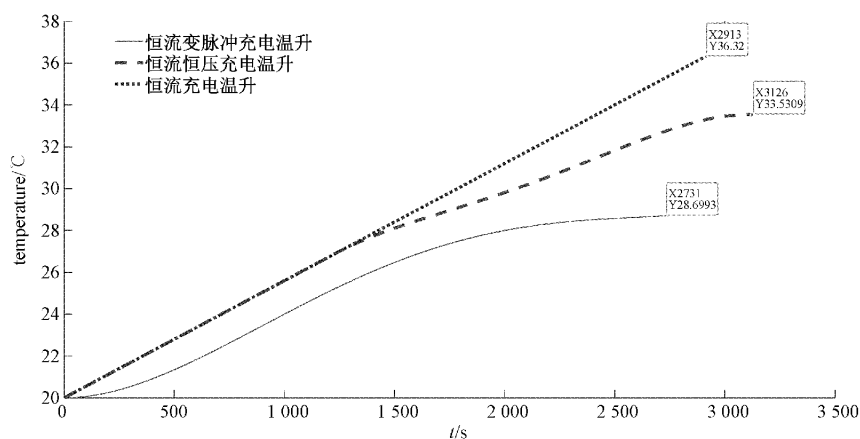


图 13 3 种充电方法温升效果图

表 4 不同充电方法所需充电时间和温升

充电方法	恒流变脉冲	恒流	恒流恒压
时间/s	2 731	2 913	3 126
温升/°C	8.70	16.32	13.48

表 5 为不同容量的锂电池通过不同的 3 种充电方法完成 SOC 充满所需要的充电时间,可从表 5 看出不论较大容量锂电池或者较小容量锂电池,恒流变脉冲的充电时间均小于恒流充电法和恒流恒压充电法。

表 5 不同容量下不同充电方法所需充电时间

容量	时间		
	恒流变脉冲/s	恒流恒压/s	恒流/s
2 000 mah	1 956	2 195	2 284
3 300 mah	2 731	2 913	3 126
5 300 mah	3 907	4 269	4 475

3 结 论

本文提出了一种基于 P&O 的恒流变脉冲充电方案,提高了最大功率点追踪精度,减小了充电时间和锂电池的极化反应,提升了无人机电池系统的耐久性。首先根据 GaAs 薄膜光电池的输出特性在 Simulink 中搭建 P&O 最大功率点搜索模型,仿真结果表明,采用的 P&O 算法实现了激光光伏阵列 MPPT 的同时,其追踪时长小于 1.2 s,最大功率点处功率扰动小于 1.69%,利用 P&O 最大功率点跟踪的方法能够有效提高激光光电转换效率,保证无人机在进行无线充电时的充电稳定性。其次是结合最大功率点搜索模型的输出并根据无人机锂电池的输出特性搭建了基于 P&O 下的恒流、恒流恒压、恒流变脉冲充电模型,本文提出的基于 P&O 的恒流变脉冲充电方案相较于前两个充电方法,能够减少 289 s 的充电时间,充电效率提升 9.45%。综上所述,本文提出的方案减小了对电池的损耗,能够最大程度的延长无人机电池的使用寿命,还提升了整体的充电速率。然而,本论文中仍有需要改进的余地,使系统更加现实,例如更小的电池尺寸、更轻的无人机和更高效的光伏电池接收器,当系统满足这些组件时,无人机可以更高效率地完成充电。

参考文献

- [1] ZHOU W, JIN K, WANG M, et al. Efficiency evaluation of laser based wireless power transmission system[C]. IEEE 2020 Applied Power Electronics Conference and Exposition(APEC), 2020:3147-3150.
- [2] ALI M, BEHROOZ M, ZIAPOUR, et al. Feasibility assessment of next-generation drones powering by laser-based wireless power transfer [J]. Optics and Laser Technology, 2021, DOI:10.1016/j.optlastec.2021.107283.

- [3] KAWASHIMA N, TAKEDA K. Laser energy transmission for a wireless energy supply to robots. Symposium on Automation and Robotics in Construction[C]. IEEE Intech Open, 2008:373-380.
- [4] 范兴明, 莫小勇, 张鑫. 无线电能传输技术的研究现状与应用[J]. 中国电机工程学报, 2015, 5(20):2584-2600.
- [5] LIU Q, WU J, XIA P, et al. Charging unplugged: will distributed laser charging for mobile wireless power transfer work[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2016, 11(4): 36-45.
- [6] 潘松, 彭小峰, 曹阳. 激光供能无人机接收端的光伏阵列重构方案[J]. 激光与红外, 2022, 52(8):1216-1222.
- [7] 刘晓光, 华文深, 刘恂, 等. 激光供能无人机光伏接收器效率优化方法[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(3):101-105.
- [8] JHA B, MALLIK B, BASNET S, et al. Design and simulation of different variants of charging lithium-ion batteries in search for optimum charging algorithm[C]. IEEE 2022 4th International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT), 2022, 752-759.
- [9] 张东虞. 锂电池的充电特性及充电方法研究[J]. 企业技术开发, 2015, 34(30):166-167.
- [10] WU X, LIU L, SHEN L, et al. Fast flexible charging strategy for electric vehicles based on lithium iron phosphate battery characteristics[C]. IEEE 2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED), 2018, 2828-2832.
- [11] 叶剑晓, 于春梅, 梁奇. 电动汽车用锂电池快速充电技术研究[J]. 电气传动, 2018, 48(6):93-96.
- [12] 王义, 刘欣, 高德欣. 电动汽车大功率充电设备的多段恒流充电方法[J]. 电子测量技术, 2021, 44(24):20-25.
- [13] LIM Y, CHOI Y W, RYOO J. Study on laser-powered aerial vehicle: Prolong flying time using 976 nm laser source [C]. IEEE 2021 International Conference on Information and Communication Technology Convergence(ICTC), 2021, 1220-1225.
- [14] 赵梦珏. 基于扰动观察法的光伏 MPPT 技术的仿真分析[J]. 电工技术, 2022(16):54-56.
- [15] 王凯, 王训春, 钱斌, 等. 高效太阳电池及其阵列技术的空间应用研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2022, 50(5): 1436-1446.
- [16] 韩明珠. 激光照射下砷化镓聚光电池光电转换效率的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018:12-20.

作者简介

曹阳, 博士, 教授, 主要从事空间激光通信技术方面的研究。
高会翔(通信作者), 硕士研究生, 主要研究方向为激光无线能量传输。
E-mail: 1286905793@qq.com