

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106073

融合卡尔曼滤波的太阳能供电系统设计

薛志凌 孟令军 王佳军 李晓宇

(中北大学 仪器与电子学院 太原 030000)

摘要: 为了满足太阳能供电系统对于输出功率稳定、太阳能转化率高、低成本、小型化和便于部署的性能要求,提出了一种应用卡尔曼滤波算法和 MPPT 技术的追光式小型太阳能供电系统。设计采用光电法追踪太阳位置,对控制过程进行了建模并在 SIMULINK 中进行了仿真。通过在经典 PID 控制的输出端加入卡尔曼滤波器以使系统达到最佳的控制效果。在功率输出端加入 MPPT 控制电路,使太阳能电池板处于最大功率输出状态。实验结果表明,该系统具有较高的太阳能利用率,良好的功率输出效果,有较高的实际应用价值。

关键词: 太阳能;太阳跟踪;卡尔曼滤波;MPPT

中图分类号: TM615 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.99

Design of solar power supply system with Kalman filter

Xue Zhiling Meng Lingjun Wang Jiajun Li Xiaoyu

(School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030000, China)

Abstract: In order to meet the performance requirements of the solar power supply system for stable output power, high solar conversion rate, low cost, miniaturization and easy deployment, a small-scale solar power supply system with track the sun using Kalman filtering algorithm and MPPT technology is proposed. The design adopts photoelectric method to track the position of the sun. The control process is modeled and simulated in SIMULINK. It is designed to add a Kalman filter to the output of the classic PID control to make the system achieve the best control effect. The MPPT control circuit is added to the power output end to make the solar panel in the maximum power output state. The experimental results show that the system has high solar energy utilization, good power output effect, and high practical application value.

Keywords: solar energy; solar tracking; Kalman filtering; MPPT

0 引言

欧洲光伏产业协会(EPIA)预测,到2030年,可再生能源将占总能源的30%以上,而太阳能光伏发电将占总能源的10%以上^[1]。利用太阳能的方式主要有3种:利用太阳能热能、太阳能发电技术、太阳能光化学转换技术^[2]。其中,太阳能发电技术发展最成熟,应用最广泛。提高太阳能发电技术中的光能转换率是当前研究的热点。提高光能转换率的方式主要有两种:1)是使用性能更好的材料制作太阳能电池板;2)是提高太阳能电池板的单位辐射量。聚光技术和太阳光跟踪技术可以提高太阳光的单位辐射量。由于聚光技术会使太阳光集中在一小块区域,很难做到将太阳辐射平均分配在太阳能电池板上,不适合在太阳能电池板上的应用。因此,相对于聚光技术,太阳光跟踪技术更适合应用在光伏发电中。实验表明,当太阳入射角为0°时,光能

转换率最高,当太阳入射角增加到45°时,光能转化率下降约30%,当太阳入射角为90°时,光能转化率几乎为0%^[3]。实现太阳光跟踪的方式主要有两种,一种是根据太阳的运行轨迹进行跟踪^[4],另一种是光电跟踪法^[5]。利用太阳的运行轨迹来跟踪太阳位置,需要知道太阳能电池板的安装的地理坐标,由于太阳的高度角和方位角变化是不均匀的,需要大量实验来拟合太阳的运动规律,这种方法不适合普遍性使用。相对而言,光电跟踪法是比较经济有效的方法。

目前的追光装置控制精度低,设备维护难且成本高,所以在国内并没有大规模使用。随5G技术的普及,未来的传感器节点将会大规模部署。但目前针对传感器采集节点的小功率,便携式的太阳能供电系统设计很少。针对此问题,本文设计了一种小功率,小型化的太阳能供电系统。采用光电跟踪法单自由度调节的方式追踪太阳的方位。使用舵机调节太阳能电池板的姿态,以跟踪太阳方位。这样简

收稿日期:2021-03-19

化了系统机械结构和系统复杂度,降低了系统的维护成本。对太阳能电池板的姿态控制过程建立了动力学模型,在常规PID控制的基础上引入卡尔曼滤波器,以提高整个控制系统的控制精度和响应时间,减小系统耗能。同时采用MPPT技术^[6]进一步提高太阳能电池板的能量利用率。

1 系统设计

1.1 系统的总体设计

系统分为太阳跟踪单元与供电单元两部分。对于太阳跟踪部分,能准确定位太阳的位置和使太阳能电池板朝向太阳是设计的关键。本设计采用数字采光器件比使用光敏电阻有更强的准确性和分辨率,能更好地确定太阳方位。通过对控制过程建模和加入卡尔曼滤波器是控制效果好于传统的PID控制^[7]。同时,在输出端利用恒压法设计MPPT电路,增强了太阳能电池板的能量利用率。另外,设计有无线通信接口和存储模块,方便对系统的监测和运行日志的记录。具体的系统框图如图1所示。

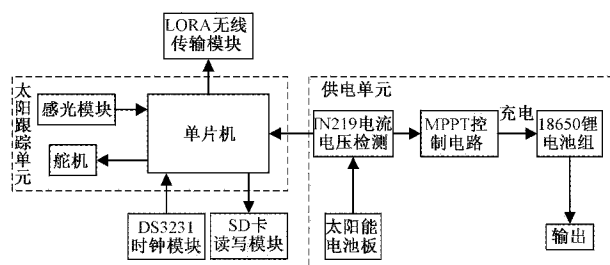


图1 系统框图

1.2 太阳跟踪原理

在太阳能电池板所在平面安装两个感光传感器。以太阳能电池板的几何中心对称安装。当太阳能电池板所在的平面与太阳光线垂直时,两个传感器所检测到的光照强度值相等时,此时收集到的太阳辐射最大。当太阳能电池板所在平面与太阳光线不垂直时,两个传感器所检测到的光照强度值便会存在差值,这样就可以调节太阳能电池板所在平面,以此实现对太阳位置的跟踪。设计使用BH1750FVI检测光照强度。不同于一般的光敏电阻,BH1750FVI不需要校准,可以直接输出光照强度的数字量。其内部有16 bit的ADC,测量精度远高于一般的光照强度测量方法。同时,可以省去使用光敏电阻测量时的运算放大器电路和A/D采样电路,达到了进一步降低设备功耗的效果。BH1750FVI支持I²C接口,可以和单片机直接通信。

1.3 系统整体控制过程

其实现起来简单,广泛应用于各种控制系统中。为了使PID控制满足闭环系统的瞬态和稳态指标,需要给PID控制器设置合适的参数^[8]。参数的确定可以通过实验获得,也可以通过建模的方法获得^[9]。本次设计是在系统建模仿真获得的参数基础上,通过实验进行微调,以获得最佳的PID控制器参数。

根据太阳跟踪原理可知,PID控制器的被控对象为太阳能电池板的姿态,姿态由舵机控制。控制器的输入参数是两个感光传感器的差值。系统的运行过程如图2所示。对整个PID控制系统建模主要有两个部分:1)舵机转动角度与感光传感器采样差值的关系模型;2)舵机的运动过程模型。

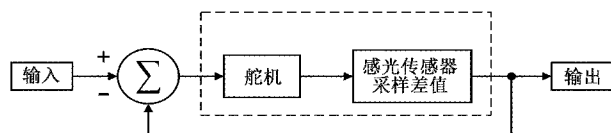


图2 太阳能电池板姿态控制过程

1.4 控制器设计原理

将太阳看成点光源。而感光传感器可以直接测量太阳光照射在其表面的照度。根据照度定理^[10],照度公式为:

$$E = \frac{I \cos \theta}{r^2} \quad (1)$$

其中, E 为照度, θ 为点光源发出的轴线与光线直射面法线的夹角。

由于太阳距离传感器的距离很大,而太阳光在某一时刻的光照强度为定值。所以令 $I/r^2=A$,式(1)可以写为:

$$E = A \cos \theta \quad (2)$$

在这个控制问题中,把太阳能电池板与太阳光线垂直的姿态作为初始状态,即 $\theta=0$ 。所以在太阳能电池板转动过程中 θ 等于太阳能电池板转过的角度。舵机转动的角度等于 $90^\circ-\alpha$ 。则式(2)改写为:

$$E = A \sin \alpha \quad (3)$$

在实际中,PID控制器单步输出的控制量很小,即太阳能电池板单步控制所改变的角度很小,所以 $\sin \alpha$ 近似等于 α 。又因为两个感光传感器对于太阳能电池板的转动为中心对称,当一个感光传感器的照度增加时,另一个感光传感器的照度会等量地减小。结合式(3),可以得到舵机转动角度与感光传感器采样差值的关系为:

$$E = 2A\alpha \quad (4)$$

图3为电池板转动示意图,其中 α 为电池板支撑臂的转角。 A 的值需要在试验中确定,其影响系统的响应。

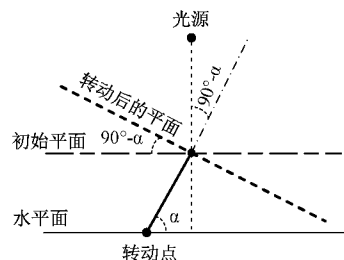


图3 电池板转动示意图

舵机主要由直流无刷电机和位置控制电路组成,通常可以通过PWM信号精确控制其转动的角度,是控制太阳能电池板姿态的核心。设计中的舵机可以在一个平面进行

0°~180°的绕动。如果采用普通的电机建模方法,模型将变得繁琐,难以分析。因此,在应用中采用阻抗模型^[11]对舵机的运动过程建模。将其运动视为阻尼运动,如图 4 所示。

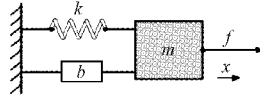


图 4 舵机转动的等效模型

根据阻抗模型可以得:

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = f \quad (5)$$

其中, k 为刚性系数, b 为阻尼系数, m 为惯性系数。

这是一个典型的二阶系统,其传递函数可以描述为:

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\epsilon\omega_n s + \omega_n^2} \quad (6)$$

根据式(5),改写传递函数为:

$$\frac{X(s)}{F(s)} = \frac{\frac{1}{M}}{s^2 + \left(\frac{B}{M}\right)s + \left(\frac{k}{M}\right)} \quad (7)$$

$$\text{令 } \frac{B}{M} = 2\epsilon\omega_n, \frac{k}{M} = \omega_n^2, \text{ 则 } B = 2\epsilon\sqrt{Mk}。$$

M 为惯性参数, k 为刚度参数。 M 可以根据舵机参数表给出的扭矩和转动角加速度算出。 k 越大刚度越大,过小会造成较大的跟踪误差,为简化模型,且在转动的过程中,力臂的形变很小。我们认为 $k=0.1$ 。 B 为阻尼参数。通过调节 ϵ 得到 B 的数值。在本次设计中,太阳能电池板的重量远小于舵机的扭力,所以取 ϵ 的值在 0~1 之间。

在整个控制过程中,将两个感光传感器的差值作为输入,控制舵机的 PWM 信号作为控制器的输出。在系统的运行中会带有测量噪声和观测噪声。因此在系统输出加入卡尔曼滤波器。其结构如图 5 所示。

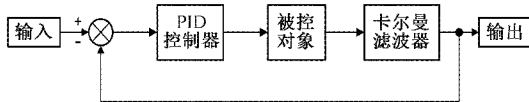


图 5 PID 控制器结构

结合式(4)和(7),合并常数项,可以得到被控对象的传递函数为:

$$G(s) = \frac{\frac{A}{M}}{s^2 + \left(\frac{B}{M}\right)s + \left(\frac{K}{M}\right)} \quad (8)$$

这是典型的二阶系统。将式(8)的传递函数引入状态变量可以写出其状态方程和输出方程分别为:

$$\dot{x}(t) = \mathbf{F}x(t) + \mathbf{H}u(t) \quad (9)$$

$$y(t) = \mathbf{L}x(t) \quad (10)$$

其中, $u(t)$ 为输出。在传递函数参数已知的情况下,可以通过 MATLAB 直接计算出方程中未知系数矩阵的值。

根据式(9)和(10),并将其离散化,写出卡尔曼滤波器^[12]的状态方程和观测方程分别为:

$$x(k) = \mathbf{F}x(k-1) + \mathbf{H}(u(k) + w(k)) \quad (11)$$

$$y_v(k) = \mathbf{L}x(k) + v(k) \quad (12)$$

其中, $w(k)$ 为过程噪声, $v(k)$ 为测量噪声。它们都是高斯白噪声。

卡尔曼滤波器的递推过程如下:

$$\begin{cases} M_n(k) = \frac{P(k)\mathbf{L}^T}{\mathbf{L}P(k)\mathbf{L}^T + R} \\ P(k) = \mathbf{F}P(k-1)\mathbf{F}^T + \mathbf{H}Q\mathbf{H}^T \\ P(k) = (\mathbf{I}_n - M_n(k)\mathbf{L})P(k) \\ y = y_v(k) - \mathbf{F}\mathbf{L}x(k-1) \\ x(k) = \mathbf{F}x(k-1) + M_n(k)\bar{y} \\ y_e(k) = \mathbf{L}x(k) \end{cases} \quad (13)$$

其中, Q 和 R 是 $w(k)$ 和 $v(k)$ 的方差。又因为 $w(k)$ 和 $v(k)$ 都服从高斯分布, Q, R 代表着噪声的大小,其值越大,噪声越大,这里设置其分别为: $Q=1, R=1$ 。 \mathbf{I}_n 为 n 阶单位矩阵。在进行计算时,需要给 $P(k-1)$ 一个初值,这样卡尔曼滤波器才能往下递推。 $P(k-1)$ 的初值可以随意选取,这里取 $P(k-1) = \mathbf{H}Q\mathbf{H}^T$ 。 $y_e(k)$ 是最后的输出。

1.5 控制器算法仿真

舵机工作时,扭矩为 0.15 kg·m,转动角加速度算为 6.5 rad/s。计算得到 $M=0.02$ 。取 $\epsilon=0.5$,计算得到 $B=2$,取 $A=0.2$ 。建立 SIMULINK 仿真模型如图 6 所示。

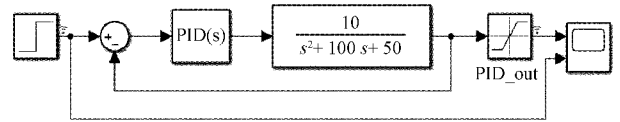


图 6 SIMULINK 仿真模型

仿真结果如图 7 所示,系统可在 2 s 内稳定。

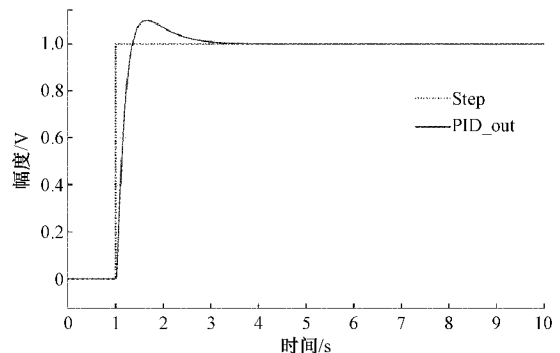


图 7 PID 控制器的阶跃响应

通过 MATLAB 计算出状态方程系数矩阵 \mathbf{F} , 输入方程的系数矩阵 \mathbf{H} , 输出方程的系数矩阵 \mathbf{L} , 分别为:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} -100 & -50 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{L} = [0 \quad 10]$$

在上面的基础上,加入卡尔曼滤波器滤波。建立新仿

真模型如图8所示,仿真结果如图9所示。可以看到新的模型噪声有很好的滤波效果。

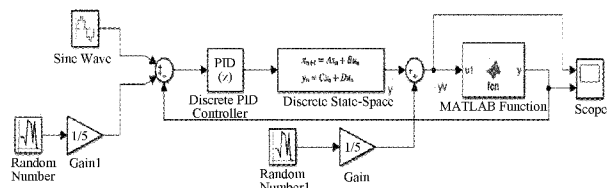


图8 带卡尔曼滤波器的PID控制器

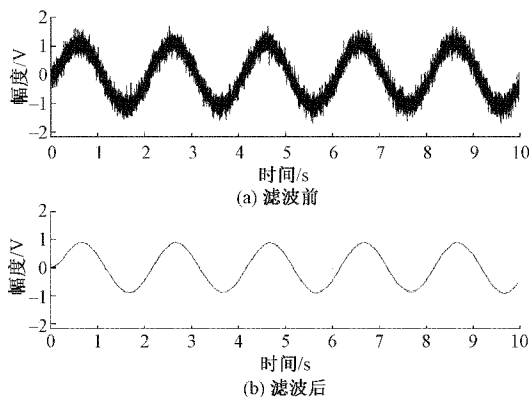


图9 对高斯噪声的滤波效果

1.6 充放电单元

太阳能电池供电系统,要满足小功率、低成本。采用两块输出功率3W的多晶硅太阳能电池板,每一块太阳能电池板额定输出电流为500mA,额定输出电压6V。将两块太阳能电池板并联,其整体的供电功率为6W。系统带有7800MAH的锂电池组。电池组的输出电压3.7V,其标准充电电压为4.2V,在实际应用中,锂电池带有充电保护电路,其最高充电电压大约为5.5V^[13]。根据需要,电能储存单元可以拓展电池组。

1) MPPT 控制电路

太阳能电池板的输出功率主要和太阳能电池板的输出电压和光照强度有关^[14]。并且在有阳光的情况下,太阳能电池的正常情况下输出电压都会高于电池组的标准充电电压。其对应关系如图10所示。从图中可以看出,在温度一定的情况下,太阳能电池板在特定电压下输出功率最大,且太阳能电池板输出的最大功率点在不同光照强度下变化不大。

最大功率点跟踪方法,包括恒压跟踪法、扰动观测法和电导增量法^[15]。恒压跟踪法应用效果好,实现简单,所以采用恒压跟踪法来跟踪太阳能电池板的最大功率输出点,即太阳能电池板的最大功率输出电压为其开路电压的大约80%。设计MPPT控制电路如图11所示,取其输入电压的76%作为最大功率输出电压。

最大功率跟踪电路基于CN3791设计,CN3791是针对太阳能电池板设计的锂离子电池充电器控制芯片,可对太阳能电池板进行最大功率点跟踪功能。CN3791可自动完

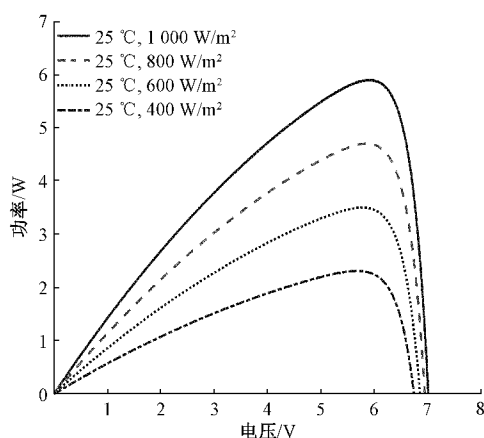


图10 太阳能电池板的最大功率输出曲线

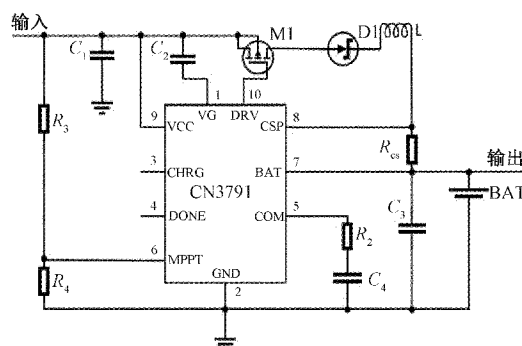


图11 MPPT控制电路

成锂电池的涓流充电,恒流充电,恒压充电的过程^[16-17]。当电池充满后,芯片会停止充电,此时系统由电池组供电。当检测到电池电量不足时,电池开始充电,此时太阳能电池板同时对电池和负载供电。由于CN3791可以检测电池板的输出电压。通过其内部反馈回路,自动调节输出电压,使系统保持最大功率输出。

2) 电流电压检测

太阳能电池板的输出端,串联有IN219电流电压检测模块。该模块支持I²C通信,检测电压0~26V,其耐流值与其采样电阻承受的功率有关。设计中使用的模块可以承受最大5A的电流,目的是为了监测太阳供电系统的输出功率。

1.7 其他模块

整个系统带有LORA无线传输模块,其支持串口通信,典型传输距离8km^[18]。通过无线发送模块,可以将太阳能供电系统运行状况和外接传感器的数据发送到远端上位机。同时自带时钟模块和SD卡储存模块,方便记录传感器采集的数据和供电系统运行数据。

2 实验

2.1 追光模式验证

在室内无光的条件下,用12W的节能灯泡模拟太阳

光。分别测试太阳能电池板 45°角固定安装和自动追光模式下,太阳能电池板的光能转换效果。通过太阳能电池板的两个感光模块读数的均值来评估系统的光能转化率,感光模块的数值越高,太阳能电池板的光能转化效果越好。实验结果如图 12 所示。该实验表明,在自动追光模式下,太阳能电池板有较高的光能转换率。

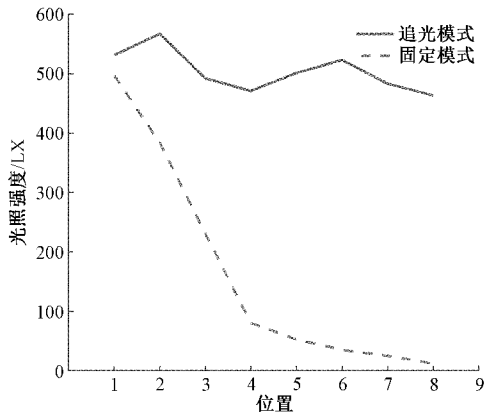


图 12 实验结果曲线

2.2 MMPT 验证

设计中太阳能电池板的额定功率为 6 W,在 12:00 时,晴天无云的情况下进行测试。测得其的输出电压为 6.9 V。通过 IN219 可以直接计算出系统的输出功率。每隔 1 min 测量一个功率输出点,总共测试 6 个点。分别实验带 MMPT 输出,固定 4.5 V 输出时系统的输出功率。测试数据如表 1 所示。实验表明,在 MMPT 模式下,太阳能电池板的输出功率比固定输出模式下高大约 7%。

表 1 MMPT 和固定输出模式功率对比 W

输出模式	太阳能电池板输出功率					平均值
带 MMPT	5.78	5.71	5.81	5.68	5.75	5.75
固定输出	5.36	5.29	5.42	5.41	5.39	5.37

3 结 论

本文论述基于融合卡尔曼滤波 PID 和最大功率跟踪的追光式小型太阳能供电系统的设计过程和原理。并详细描写了对控制过程建模和仿真,同时进行实验测试。通过仿真可以看到该系统响应快,同时对噪声有很好的滤波效果。实验表明,系统不仅对太阳光有良好的跟踪效果,而且加入最大功率跟踪电路,提高了系统的输出功率,并且拓展了无线通信设计,提高了系统的实用性。针对实际应用,系统对设计做了工程的优化,具有较高的理论意义和实用值。

参考文献

[1] DONG Y, MA H, HU X, et al. Design and production for automatic tracking system of portable solar panel [C]. 2019 International Conference on

- Robots & Intelligent System (ICRIS), 2019:18-21.
- [2] 蔡世杰. 太阳能利用技术研究现状及发展前景[J]. 中国高科技, 2018(21):50-52.
- [3] STOCKHAUSEN V, ANDRADE L, IVANOU D, et al. Incident angle and light intensity variation: A comparative impact study on perovskite, dye-sensitized and silicon heterojunction solar cells towards building-integrated applications[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2019,191:451-458.
- [4] 张屹, 胡盘, 刘成恒. 基于 GPS 定位的太阳能板自动追光系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2020,28(1):214-218.
- [5] 邱燕. 太阳能电池板自动跟踪系统的分析与研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2019(4):59-62.
- [6] 王永光, 戈庆长. 分布式光伏发电系统多峰值 MPPT 优化研究[J]. 电力科学与技术学报, 2020,35(2):3-11.
- [7] 许云兰. 基于改进 PID 控制的数控机床油温控制系统研究[J]. 国外电子测量技术, 2019,38(8):23-27.
- [8] 唐瑞, 侯宏录, 王秀. 视轴稳定系统的模糊 PID 控制器设计[J]. 电子测量技术, 2019,42(4):1-5.
- [9] 陈梅, 王健. 基于 MATLAB GUI 的 Ziegler-Nichols PID 参数整定仿真系统[J]. 实验室研究与探索, 2020,39(6):98-101, 122.
- [10] 蔡佩君, 郑晓东, 闻春教, 等. 光照度平方反比定律在 LED 光源中的应用与探讨[J]. 实验室研究与探索, 2020,39(5):63-66.
- [11] 潘冬, 李大明, 胡成威, 等. 一种基于位置阻抗的机械臂抓捕飞行器控制方法[J]. 载人航天, 2018,24(3):308-312.
- [12] 张国强, 鲁昌华, 李燕, 等. 小波变换与改进 Kalman 在北斗/SINS 组合导航中的研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2019,33(7):65-71.
- [13] CHAO W, CHUNBO Z, JINLEI S, et al. Fault mechanism study on Li-ion battery at over-discharge and its diagnosis approach[J]. IET Electrical Systems in Transportation, 2017,7(1):48-54.
- [14] 张湧涛, 郭颖. 用于无线传感器节点的太阳能 MPPT 算法研究[J]. 中国测试, 2018,44(2):113-117.
- [15] 李紫倩. 离网型太阳能发电系统的分析与研究[D]. 保定:河北大学, 2014.
- [16] 袁臣虎, 李海杰, 王岁, 等. 锂电池四阶段智能充电方法的研究[J]. 电源技术, 2019,43(3):402-404.
- [17] 刘大同, 宋宇晨, 武巍, 等. 锂离子电池组健康状态估计综述[J]. 仪器仪表学报, 2020,41(11):1-18.
- [18] 蔡青松, 林佳. 提升 LoRa 网络性能的终端参数动态选择方法研究[J]. 计算机工程与应用, 2020,56(3):113-120.

作者简介

薛志凌,工学硕士,主要研究方向为先进控制技术、机器人自主导航技术、路径规划。
E-mail:1241667099@qq.com