

# 一种 BUCK 断续模式太阳能控制系统的设计与实现<sup>\*</sup>

黄钉劲 马莎莎 杨爽

(西安工业大学光电工程学院 西安 710021)

**摘要:** 为了实现太阳能资源在未来电动车控制系统中的合理应用,以及太阳能控制系统传输特性的稳定精度,基于降压斩波电路,利用电感电流断续模式设计了一种 3 000 W 大功率 MPPT 太阳能控制系统。通过分析 BUCK 电路的连续模式与断续模式在输入条件持续变化下不同的输出特性,对主电路在不同输入电压条件下的输出电流进行了测试比较,测试结果表明:断续模式的输出电压稳定,其纹波小于 5%,系统的输出特性符合相关标准的技术要求,得出电流电感断续模式更加符合设计要求。

**关键词:** 稳压型太阳能控制系统;最大功率追踪;BUCK 电路;断续模式

**中图分类号:** TN707 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510

## Design and implementation of a solar control system based on the discontinuous-mode BUCK power stage

Huang Dingjin Ma Shasha Yang Shuang

(School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** In order to realize the suitable applications of solar energy in electric vehicle control in the future, and ensure the precision and stability of system transmission characteristics, a 3 000 W high-power MPPT solar power system, based on BUCK chopper circuit, was designed with the principle of discontinuous-mode in this paper. Under the circumstance of constantly changing input, the output characteristics of continuous-mode and discontinuous-mode buck power stage were different from each other. And several tests about output current were carried out when input voltage is different. The results of tests show that according to the test, the stability of output voltage was more stable under discontinuous current mode, and the ripple is less than 5%. The output characteristics of this system meet the technical requirements. As a result, it's more appropriate to use discontinuous-mode to realize the demands of design.

**Keywords:** converting mode solar power controller; maximum power point tracking; BUCK circuit; discontinuous-mode

### 1 引言

太阳能充电技术目前已经成为各国竞相研究的应用技术,同时也是与前沿理论与未来新能源、电动车发展紧密相关的技术。国家能源局指定《可再生能源发展“十二五”规划》,大力发展可再生能源,继续加大对太阳能的利用<sup>[1]</sup>。电动自行车、电动汽车逐渐取代自行车、汽车成为人们出行的首选交通工具,但受蓄电池容量限制,其行驶的距离无法满足人们的需求。建设太阳能电动车充电系统,可以在一定程度上缓解这种情况。文献[2]分析了 BUCK 变换器稳态情况下在电感电流连续模式的输出电压稳压情况,其精度无法满足充电系统的要求,输出电压

波动较大,电压传输特性不理想。文献文献[3]分析了 DC/DC 变换器中的电感电流断续模式在混合动力车主电路中的应用,其中论述了利用单一电流采样电阻实现双向平均控制,以及如何较好地利用同步整流断续工作模式达到输出的稳定控制。太阳能充电站的设计中,主电路实现的充电效率是整个系统实现的关键,通过实现太阳能最大功率点追踪,控制主电路中开关管的通断,调节占空比来实现输出电压的稳定,从而保证整个系统工作的合理性和高效性<sup>[4-6]</sup>。

针对上述问题,本文采用 DC/DC 变换器 BUCK 降压斩波电路的电感电流断续模式,设计了一种输出稳压精度高、纹波系数小的独立太阳能控制系统,结合最大功率追

收稿日期:2015-08

\* 基金项目:中央财政支持陕西高校发展专项基金

踪技术以及蓄电池的三阶段充电技术,保证系统能够稳定工作在太阳能组件的最大功率点,并实现蓄电池的高效充电。

## 2 太阳能控制系统原理与设计

在太阳能技术研究的相关领域中,除了目前太阳能并网发电所需要的太阳能逆变器外,另外一个重要的部分就是采用 DC/DC 变换稳压控制技术的直流输出型的太阳能控制器。这种控制器,一般称为变换稳压型太阳能电源控制器,其结构如图 1 所示。其中,核心部分为太阳能电源变换模块。

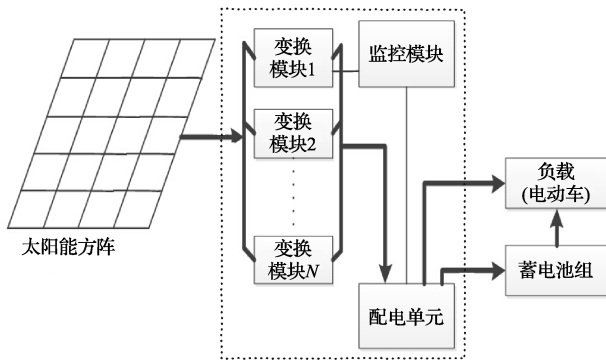


图 1 输入并联型太阳能控制系统原理

太阳能组件经光线照射后发生光电效应产生电流,其生成的电流是具有波动的曲线,若直接给蓄电池或负载供电,易损坏蓄电池和负载。因此先将输出电流通过太阳能变换模块,通过一系列控制电路保证系统正常工作,并加入多级充放电保护和监控措施,在白天有光照时,系统储存电能或直接给负载供电;夜间或阴雨天,储能蓄电池完成对负载的充放电过程。

太阳能电源变换模块的技术要求主要有负载效应、源效应、稳压精度<sup>[7]</sup>。负载效应是指,在不同负载情况下的直流输出电压与输出电压整定值的差值应不超过输出电压整定值的±0.5%。源效应是指,在不同输入电压情况下的直流输出电压与输出电压整定值的差值应不超过输出电压整定值的±0.1%。稳压精度是指不同输入电压与负载进行组合,直流输出电压与输出电压整定值的差值应不超过输出电压整定值的±0.6%。

太阳能组件的输出功率受光强、温度等环境的影响,从而其输出功率并不稳定。在实际应用中,为保证系统的可靠性,太阳能组件的设计通常要留有很大的裕量,以保证能为蓄电池及时充电。为高效地利用太阳能,具有最大功率跟踪功能的太阳能控制便应运而生。

### 2.1 BUCK 电路连续模式分析

如图 2 所示为 BUCK 电路原理,BUCK 电路的工作原理是:由驱动电路驱动 MOS 管通断,将输入端的电流不断地输入到后续电路中,在电感 L 中进行储能。当

MOS 管接通时,电感 L 充电;当 MOS 管断开时,电感 L 放电<sup>[8]</sup>。根据 L 储存能量的不同,BUCK 电路可分为电感电流断续模式和连续模式。

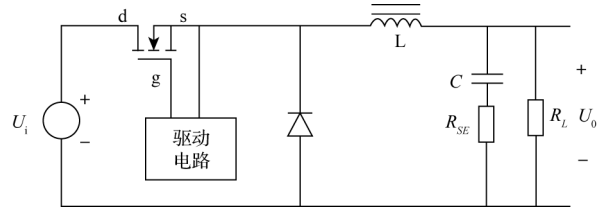


图 2 BUCK 电路原理

当电路中的电感工作在连续状态时,电感中仍然保留部分电流,其波形如图 3 所示。在 BUCK 电路的工作过程中,电路首先工作在电感电流断续状态,当系统输出电流达到一定条件时,电路进入到电感电流连续状态。在实际 BUCK 电路中,一般两种状态都会存在。

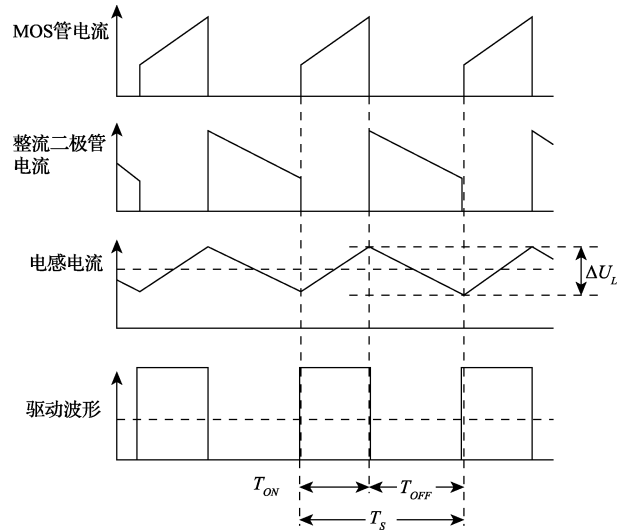


图 3 电感电流连续模式波形

为了实现最大功率跟踪算法,主电路一般工作在电感电流连续状态,此时系统的输出特性与输入特性关系为:

$$\frac{U_o}{U_i} = \frac{I_i}{I_o} = D \quad (1)$$

式中: $D$  为系统的占空比; $U_i$  为系统实时采样输入电压; $U_o$  为系统的输出电压。通过设定  $U_o$ , 计算出对应的占空比,控制系统自动调节,以实现系统的稳定输出。

系统的输出纹波  $\Delta U_o$  表达式为:

$$\Delta U_o = \frac{(1-D)U_D}{L_f f_s} ESR \quad (2)$$

式中: $ESR$  为输出电容的等效串联电阻; $L_f$  为输出续流电感; $f_s$  为系统的开关频率。

电感电流连续工作时,占空比与输入、输出电压的比值以及输入电流与输出电流的比值有关。在寻找 MPPT 功率点的过程中,当输入电压不变,输入电流变化时,系统

的占空比会因为输入电流与输出电流的比值发生变化而变化。占空比改变后,会引起输出电压发生变化。当输入电压变化,输入电流不变时,系统的占空比由于输入电压变化而发生变化,但此时系统的输入电流与输出电流比值不变,系统的占空比朝着稳定值变化,不受程序的控制,最终引起输出电压的变化。这样的控制系统,通常输出电压波动较剧烈。

### 2.2 BUCK 电路断续模式分析

当电路中的电感工作在断续状态时,电感中的电流全部释放给后续电路,其波形如图 4 所示。

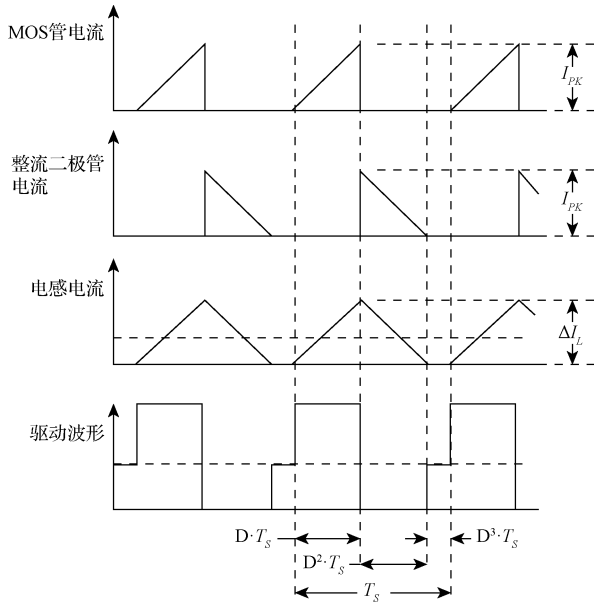


图 4 电感电流断续模式波形

电感电流工作在断续模式时的输入输出关系为:

$$\frac{U_0}{U_i} = \frac{D}{D + \Delta D} \quad (3)$$

式中:

$$\Delta D = \frac{U_0 - U_i}{U_0} D \quad (4)$$

此时,系统的输出平均电流为  $I_{og}$ :

$$I_0 = \frac{D^2}{2L_f f_s} \left( \frac{U_i}{U_0} - 1 \right) U_i \quad (5)$$

电感电流临界连续时的负载电流为  $I_{og}$ :

$$I_{og} = \frac{(1 - D)U_0}{2L_f f_s} \quad (6)$$

BUCK 电路工作在电感电流断续时,系统的输出电压不仅与占空比  $D$  有关,而且与系统的输出电流  $I_0$  也有关。当系统的输入电压变化、输出电压不变时,临界负载电流最大值为  $I_{og\max}$ :

$$I_{og\max} = \frac{U_0}{2L_f f_s} \quad (7)$$

则:

$$I_{og} = (1 - D_{\max}) I_{og\max} \quad (8)$$

此时,系统的占空比  $D$ :

$$D = \frac{U_0}{U_i} \sqrt{\frac{I_0 / I_{og\max}}{1 - U_0 / U_i}} \quad (9)$$

当系统的输出电流  $I_0 < I_{og}$  时,系统工作在电感电流断续模式。此时,占空比只与输入电压、输出电压、输出电流有关。当系统的输出电流  $I_0 = I_{og}$  时,系统工作在电感电流临界连续状态,此时,系统的占空比达到断续模式时的最大值,系统的工作状态仍可按照断续模式时进行处理。当系统的输出电流  $I_0 > I_{og}$  时,系统进入电感电流连续工作模式,其占空比因此发生跳变,导致系统的输出电压也跟着发生了跳变。

在跟踪太阳能最大功率点时,当组件的输出电压变化而输出电流不变时,系统的占空比随输出电压的变化而变化,从而保证了输出电压的稳定。当控制系统的输入电压不变而输入电流变化时,其占空比保持不变,当然输出电压也不变。这样就保证了控制系统在进行最大功率点追踪时,保持输出电压稳定。

### 3 最大功率追踪系统分析

最大功率跟踪 (maximum power point tracking, MPPT) 是通过采集太阳能组件的输出电压与输出电流,获得并保持太阳能电池最大输出功率的技术。当太阳能电池的输出电压大于  $V_{mpp}$  时,充电电路从太阳能组件中获取所需电流,此处为最大功率点。随着充电电流的增加,太阳能电池板的输出电压减小,当输出电压小于  $V_{mpp}$  时,控制系统启动电流管理,对太阳能电池输出电流进行控制,使其保持在最大功率点<sup>[9-10]</sup>。

由于采用了 MPPT 技术,系统的输入特性变得复杂和不确定,这就要求系统必须有很快的响应以保证输出的稳定。为了对系统参数进行实时调节,太阳能控制系统的主电路通常采用非隔离型的 DC/DC 电路拓扑,最常用的两种拓扑结构为降压型 (BUCK 电路) 和降压-升压型 (BUCK-BOOST 电路)。考虑到降压-升压型拓扑更加复杂,主要研究降压型电路。

### 4 太阳能控制系统设计

设系统的输出电压为 54 V、输出电流为 60 A,系统的输入电压为 58~120 V。为了保证系统工作在电感电流断续模式,系统的输出电流  $I_0 \leq I_{og}$ , 这里取 60 A。

由式(8)、(9),系统断续工作时,系统的最大占空比为  $D_{\max}$ :

$$\frac{U_i}{U_0} \left( \frac{U_i}{U_0} - 1 \right) D_{\max}^2 + D_{\max} = 1 \quad (10)$$

令:

$$\frac{U_i}{U_0} = \frac{1}{D_c} \quad (11)$$

式中:  $D_c$  为系统连续模式下的占空比。

由此得到:

$$D_{\max} = \sqrt{\frac{D_c^4 + 4(1 - D_c) - D_c^2}{2(1 - D_c)}} \quad (12)$$

因为  $D_{\max} > 0$ , 由此推出  $D_c < 0.75$ , 同理可以推出  $D_{\max} < 0.75$ , 取  $D_{\max} = 0.7$ 。由式(8)得到  $I_{\text{ogmax}} = 200 \text{ A}$ ; 由式(7)得  $L_f f_s = 0.135$ ; 取系统的开关频率  $f_s = 24 \text{ kHz}$ , 则系统的输出续流电感  $L_f = 5.6 \mu\text{H}$ 。

根据式(10)~(12)计算得到的系统参数, 选取合适的器件, 最后完成的 3 000 W 太阳能控制系统的主电路的设计, 其主电路结构图 5 所示, 整个系统搭建的实物如图 6 所示。

系统的主电路构成如图 5 所示, 即典型的 BUCK 型变换器, 前级使用两个  $1\ 000 \mu\text{F}/250 \text{ V}$  的大电容, 两个  $0.33 \mu\text{F}/400 \text{ V}$  的小电容进行滤波, 以保证进入变换器的电压波形, 并通过脉宽芯片的输出控制占空比, 以改变对储能蓄电池的充电电流, 实现太阳能电池的最大功率追踪。输出接  $1\ 000 \mu\text{F}/100 \text{ V}$  大电容滤波, 保证了输出电压波形的精度。同时, 还通过主电路来完成太阳能电池电压的采集及蓄电池电压、充电电流的采集, 经过数据处理后方便控制电路实现对系统的跟踪保护功能。在图 5 中的输入级与输出级均传入了霍尔传感器(T201、T202)检测直流母线电流的大小。

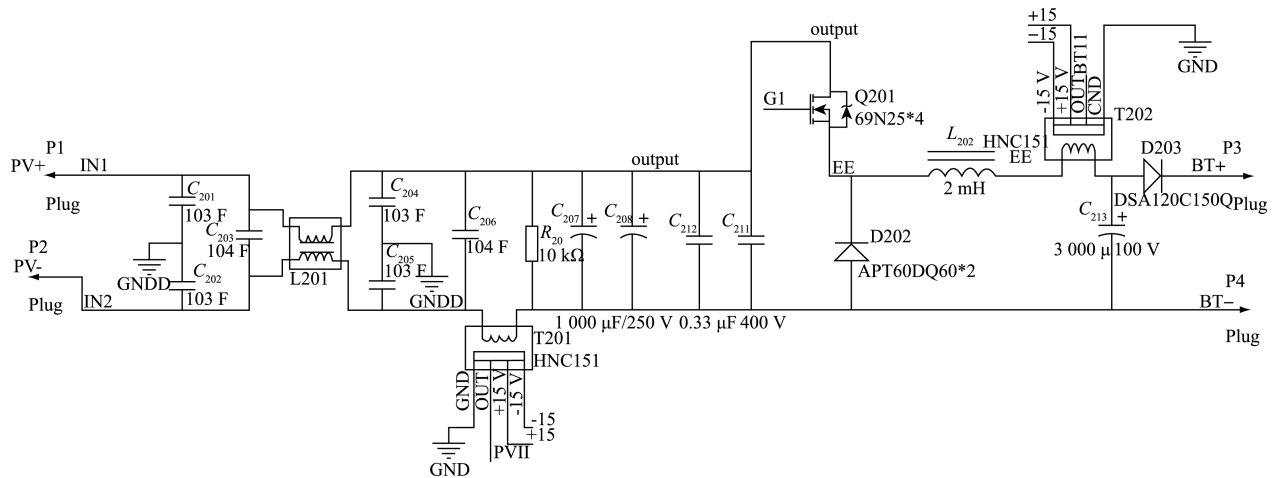


图 5 太阳能控制系统主电路

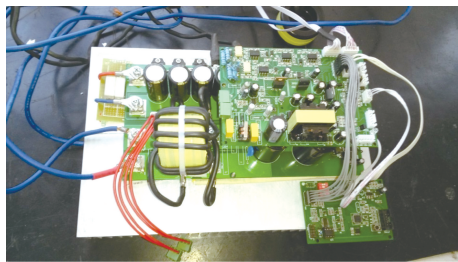


图 6 太阳能控制系统实物

### 5 实验结果与分析

由于电感电流断续模式与电感电流连续模式的电路基本结构类似, 在不改变控制部分与反馈部分的情况下, 分别对电感电流连续模式与电感电流断续模式的主电路进行了对比测试, 实验结果如表 1 和 2 所示。

表 1 电感电流连续模式下太阳能控制系统输入输出特性

| 输入电压/V | 输出电流/A |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|--------|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|        | 0      | 1    | 2    | 5    | 10   | 15   | 20   | 30   | 40   | 50   | 60   |
| 60     | 53.8   | 54.1 | 54.2 | 54.8 | 54.7 | 54.9 | 54.8 | 54.8 | 54.5 | 54.7 | 54.9 |
| 70     | 53.9   | 54.1 | 54.1 | 54.8 | 55.3 | 55.4 | 55.1 | 54.6 | 54.5 | 54.7 | 55.1 |
| 80     | 53.9   | 54.1 | 54.2 | 55.0 | 55.1 | 55.4 | 55.0 | 54.7 | 54.5 | 54.6 | 55.0 |
| 90     | 53.9   | 54.0 | 54.1 | 54.6 | 55.0 | 55.4 | 55.1 | 55.0 | 54.8 | 54.6 | 55.0 |
| 100    | 53.8   | 54.1 | 54.1 | 54.7 | 54.8 | 55.3 | 55.2 | 54.8 | 54.8 | 54.7 | 54.9 |
| 110    | 53.8   | 54.1 | 54.2 | 54.7 | 54.9 | 55.3 | 55.1 | 54.9 | 54.8 | 54.7 | 54.9 |
| 120    | 53.8   | 54.1 | 54.2 | 54.7 | 55.0 | 55.4 | 54.9 | 54.8 | 54.8 | 54.7 | 54.9 |



表2 电感电流断续模式下太阳能控制系统输入输出特性

| 输入<br>电压/V | 输出电流/A |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------------|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|            | 0      | 1    | 2    | 5    | 10   | 15   | 20   | 30   | 40   | 50   | 60   |
| 60         | 54.4   | 54.4 | 54.3 | 54.4 | 54.3 | 54.4 | 54.4 | 54.4 | 54.4 | 54.4 | 54.3 |
| 70         | 54.4   | 54.4 | 54.4 | 54.3 | 54.4 | 55.4 | 54.4 | 54.3 | 54.4 | 54.4 | 54.4 |
| 80         | 54.4   | 54.4 | 54.4 | 54.3 | 54.4 | 55.4 | 54.4 | 54.4 | 54.3 | 54.3 | 54.4 |
| 90         | 54.4   | 54.4 | 54.4 | 54.4 | 54.4 | 55.4 | 54.4 | 55.4 | 54.4 | 54.3 | 54.4 |
| 100        | 54.4   | 54.4 | 54.4 | 54.4 | 54.4 | 55.3 | 54.4 | 54.4 | 54.3 | 54.4 | 54.4 |
| 110        | 54.4   | 54.4 | 54.4 | 54.4 | 54.4 | 55.3 | 54.4 | 54.4 | 54.3 | 54.4 | 54.4 |
| 120        | 54.4   | 54.4 | 54.4 | 54.4 | 54.4 | 55.4 | 54.4 | 54.3 | 54.3 | 54.4 | 54.4 |

由表1可见,电感电流连续模式工作时,当负载电流变到5A时,系统输出发生了明显的跳变。系统中电感设计为80μH,其他参数都不变。由式(6)计算得,系统的电感电流临界连续时的负载电流 $I_{og} \approx 5A$ 。当输出电流 $I_o > 5A$ ,系统输出虽然还有波动,但这属于电感电流连续模式下的输出纹波0.7V。输出纹波要求不大于5%, $0.5\% \times 54V = 0.27V$ ,连续模式下的电压纹波大于0.27V,会造成输出电压不稳定,影响系统的工作效率。

由表2可见,将系统的电感电流临界连续时的负载电流 $I_{og}$ 调高到60A以上时,控制系统在输出电流 $I_o = 5A$ 附近时,不再发生电压跳变。在整个电感电流断续模式下工作时,系统的输出电压的纹波在0.2V左右,系统标定的电压纹波要满足 $\Delta U < 0.5\%$ 即 $0.5\% \times 54V = 0.27V$ ,表2验证的输出纹波满足 $0.2V < 0.27V$ ,满足系统的负载效应、源效应以及稳压精度的要求。

分析表1和表2数据可知,在断续模式工作时,输出电压波动小、稳压精度高,有利于追踪系统光伏组件的最大功率点,进而更加高效地实现了太阳能充电效率的提高。

## 6 结论

在电路设计时,需要根据系统的不同要求选择BUCK电路不同的工作模式。

1)通过对BUCK主电路两种工作模式:电感电流连续模式和电感电流断续模式进行分析对比,由于太阳能系统的输出特性的变化,在电感电流连续模式下,系统的主电路结构上存在严重的缺陷,输出电压波动较大,而断续模式很好地抑制了这些缺陷。

2)结合主电路设计系统参数计算以及外界环境对系统的影响,通过计算及测试验证,系统的开关频率 $f_s = 24kHz$ ,输出续流电感 $L_f = 5.6\mu H$ 。在输入电压范围60~120V变化时,系统输出基本保持在54V左右,工作在断续模式的占空比为0.7。

3)电感电流断续模式工作时,其电压纹波在0.2V左右,满足系统要求的输出电压纹波范围 $\Delta U < 0.5\%$ ,

保证了系统输出电压的稳定,使系统能够较好地完成最大功率点的追踪,有效地提高了太阳能控制系统的充电效率。

## 参考文献

- [1] 张臻,沈辉,舒杰,等.便携式集成光伏系统的设计与性能分析[C].第八届光伏会议论文集,2011:612-616.
- [2] 刘熹,张剑锋,朱洪俊.高效光伏电能收集器的设计与实现[C].中国仪器仪表学会2010年学术产业大会,2010:25.
- [3] 胡庆波,阳岳丰,周利强,等.全数字双向DC/DC变换器中电流断续控制的研究[J].电力电子技术,2006,40(2):54-55.
- [4] 刘璇.太阳能光伏中的测试测量技术[J].国外电子测量技术,2012,31(4):5-6.
- [5] 李钟实.太阳能光伏发电系统设计与施工维护[M].北京:人民邮电出版社,2010.
- [6] 王长贵,王斯成.太阳能光伏发电实用技术[M].北京:化学工业出版社,2009.
- [7] 于晶荣,曹一家,何敏,等.单相单级光伏逆变器最大功率点跟踪方法[J].仪器仪表学报,2013,34(1):18-25.
- [8] 秦奋,赵强,苏成利.电动汽车无线充电系统仿真与设计[J].国外电子测量技术,2014,33(7):45-48.
- [9] 郑诗程,刘伟,葛芦生.具有TMPPT功能的太阳能光伏充电系统研究[J].电子测量仪器与学报,2008,22(3):11-15.
- [10] 王斯成.光伏电源系统的计算机辅助设计[J].太阳能学报,1986,12(3):251-253.

## 作者简介

黄钉劲,1965年出生,教授。主要研究方向为现代传感与检测技术。

E-mail: 249246137@qq.com