



多模直流模块式光伏发电 系统前级 DC/DC 变换器研究

嘉兴学院机电工程学院 ■ 周晨 刘春元* 谢玉飞

摘要: 对 DC/DC 变换器进行了分析,以半桥变换器为研究内容,讨论了多模直流模块式光伏发电系统的结构及性能;并介绍了变换器的运行控制,包括 MPPT 控制、恒压控制、恒功率控制;最后进行了理论分析与仿真验证,得到结论:隔离型电流馈电半桥变换器能够较好地实现高电压增益和高效率,在进行控制仿真时,选用的扰动观察法能够很好地观测输出功率,从而得到预期的效果,验证了变换器的可行性。

关键词: DC/DC 变换器;多模直流模块式;最大功率点跟踪;高电压增益

0 引言

DC/DC 变换器是光伏发电系统中的一个重要组成部分,具有高电压增益的特点,能够将光伏组件发出的不稳定的微弱电压进行放大,而且可提高光伏发电的利用率。DC/DC 变换器是通过控制半导体开关来控制输出电压的电路。由于自身具有一系列的优点,直流模块式光伏发电系统在今后的应用必然越来越多,因此,开展其核心部分——前级 DC/DC 变换器的研究对促进光伏产业的发展具有重要的现实意义。

本文分析了光伏发电系统的结构及性能,通过对 DC/DC 变换器进行分析,选择了隔离型电流馈电半桥变换器,并进行了理论分析与仿真验证。

1 DC/DC 变换器的分析与选择

对于光伏发电系统而言,要使输出电压升高,应选择具有升压的电路;而要实现高效率,可以

加入软开关技术。光伏组件的最大电压一般为 50 V,而直流母线电压一般为 200 V^[1]。由于升压较高,因此不能选用一般的非隔离型升压变换器,虽然仍可以选择级联的非隔离型变换器,但其安全性能较低^[2]。相较于非隔离型变换器,隔离型变换器显然更加安全。但一般的隔离型变换器效率较低,不能满足要求,因此要选择既能实现高电压增益,又能提高光伏发电系统效率的变换器。

半桥变换器与推挽型变换器相比,不存在偏磁问题,变压器结构简单,因此,本文选用半桥变换器。半桥变换器的输出电压 U_0 为:

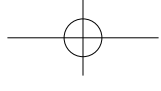
$$U_0 = \frac{N_2}{N_1} \cdot \frac{T_{on}}{T} \cdot U_m \quad (1)$$

式中, N_1 、 N_2 分别为变压器一、二次侧匝数; T_{on} 为开关管的导通时间; T 为开关周期; U_m 为峰值电压。

收稿日期: 2018-10-11

基金项目: 嘉兴市科技计划项目 (2017AY13017)

通信作者: 刘春元 (1979—), 男, 博士, 主要从事新能源的开发和利用方面的研究。liuchunyuanyan_zjx@163.com



由于在半桥变换器中存在电容,而电容又具有隔直的作用,因此当半桥变换器中2个开关管的导通时间不一致时,半桥变换器可以起到自动平衡的作用。通常存在变压器的变换器可轻易实现高电压增益。半桥变换器有电压馈电与电流馈电2种形式,分别如图1、图2所示。

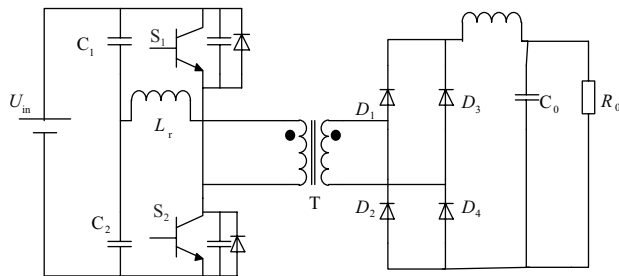


图1 电压馈电半桥变换器

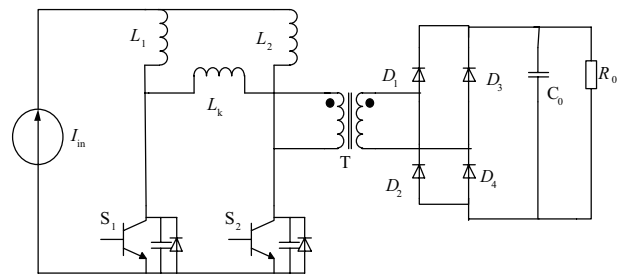


图2 电流馈电半桥变换器

电压馈电半桥变换器通过控制开关 S_1 和 S_2 的交替导通,使电路工作在不同状态下;通过改变开关的占空比可以改变输出电压的值^[3]。

通过与图1对比分析可发现,电流馈电半桥变换器的结构较为简单,且所用元器件少,开关损耗与导通损耗较小,可以提高整个系统的利用效率^[4]。因此,选择电流馈电半桥变换器较为合适。

综上所述,本文选择隔离型电流馈电半桥变换器进行研究。

2 直流模块式光伏发电系统的结构及性能

直流模块式光伏发电系统的结构可分为串联直流模块、旁路直流模块和并联直流模块3种结构。

2.1 串联直流模块

由于光伏发电得到的输出电压通常较小,只有几十伏,因此一般通过串联若干个光伏组件从而得到较高的直流母线电压。在串联直流模块式

系统结构中,每个单独的光伏组件可以分别进行MPPT控制,当其中1个光伏组件处于阴影或失配条件下时,系统中的其他组件仍会正常工作。因此,将不同类型的光伏组件组合在一起就成为光伏发电系统。

图3为串联直流模块式光伏发电系统结构图,在一定条件下,能够让每个单独的光伏组件都工作在其最大功率点处,以此来增加能量的转换效率。

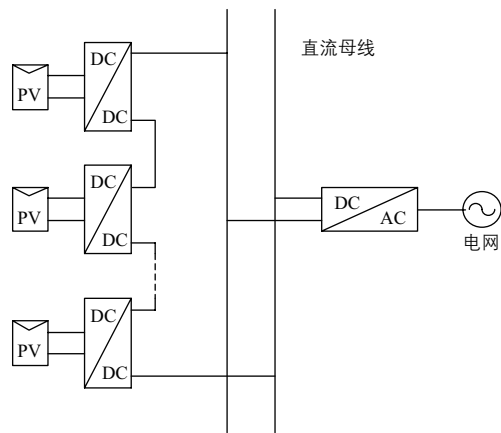


图3 串联直流模块式光伏发电系统结构图

假设在某个光伏发电系统中串有 n 个直流模块,设第 k 个光伏组件的输出电压为 U_k 、输出功率为 P_k ,则串联直流模块的输出功率 P_o 为:

$$P_o = \sum_{k=1}^n P_k \quad (2)$$

对于串联直流模块,其输出电流相同,根据电流、电压和功率之间的关系,可知输出电压与输出功率成正比,若直流母线电压为 U ,则光伏组件的输出电压 U_k 为:

$$U_k = \frac{P_k}{P_o} U \quad (3)$$

光伏组件的输出电压具有一定的取值范围,其需满足:

$$U_{\min} \leq U_k = \frac{P_k}{P_o} U \leq U_{\max} \quad (4)$$

由式(3)~式(4)可以看出,光伏组件的输出功率有特定的范围,当超出特定范围时,直流模块将会退出运行,造成系统能量的损失^[5]。

2.2 旁路直流模块

在串联直流模块中,不同光伏组件在不同光

照条件时的输出电流不同，而其输出电流受到最小输出电流的限制，这种情况会降低组件输出能力，严重时还会产生热斑。因此，为了改善输出能力，可以为每个光伏组件集成 1 个 DC/DC 变换器，组成旁路直流模块；而且为了使光伏组件的输出电压相等，可使该 DC/DC 变换器的输出电压与输入电压相等，即每个光伏组件的输出电压都为 U_0 ，则可利用式 (2) 求得旁路直流模块的输出功率。

图 4 为旁路直流模块式光伏发电系统结构图，其中需要使每个光伏组件的电气特性相同。但由于在不同的光照条件和温度下，电气特性一致时，最大功率点也不可能是一条线上，因此旁路直流模块也不能保证每个光伏组件工作在最大功率点，只能保证每个光伏组件工作在相同电压下的最大功率点^[6]。

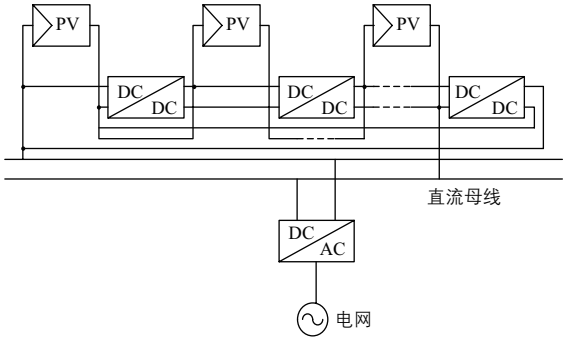


图 4 旁路直流模块式光伏发电系统结构图

2.3 并联直流模块

上述两种模块虽然可以提高光伏发电系统的转换效率，但是系统只能以串为单位进行扩容，而且线路也较为复杂。因此可采用并联集成模块，当集成 1 个 DC/DC 变换器时，可以将光伏组件输出的较低电压变换为较高电压，同时也可以进行独立的 MPPT。则可利用式 (2) 求得并联直流模块的输出功率。

图 5 为并联直流模块式光伏发电系统结构图。并联直流模块中，每个模块工作时相互不影响，且输出电压受到直流母线电压的钳位。此时，每个模块单独工作在自己的最大功率点处^[7-8]。

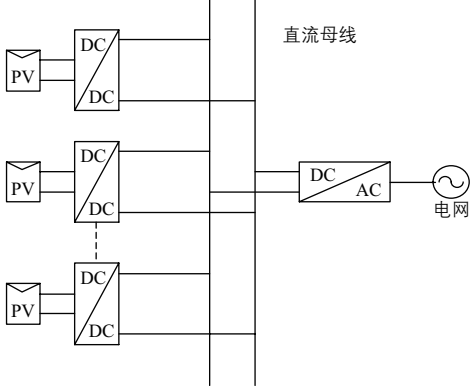


图 5 并联直流模块式光伏发电系统结构图

2.4 3 种结构的性能对比

串联直流模块、旁路直流模块、并联直流模块 3 种结构的性能对比如表 1 所示。

表 1 直流模块式光伏发电系统的结构和性能比较

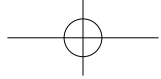
结构 项目	串联直流 模块	旁路直流 模块	并联直流 模块
MPPT 性能	光伏组件独立 MPPT	组件串范围内 MPPT	光伏组件独立 MPPT
可扩展性	一般	不好	好
系统复杂度	简单	复杂	简单
变换器增益	不高	不高	高
抗失配性	一般	好	很好
容错性	差	一般	好
运行成本	高	低	低
能量转换效率	高	低	低

由表 1 可知，串联直流模块的能量转换效率高且系统较简单，但是容错性差，变换器增益不高；旁路直流模块的能量转换效率低，可扩展性差，虽然运行成本低，但变换器增益同样不高；而并联直流模块可扩展性好，系统不复杂，抗失配性很好，容错性也好，变换器增益高。

3 变换器的运行控制策略研究

3.1 恒功率控制

光伏发电系统运行时，光伏组件的输出功率为恒定值。假设在 t 时刻光伏组件的输出电流为 $I(t)$ 、输出电压为 $U(t)$ 、输出功率为 $P(t)$ ，求出输出功率的期望值 $P_{ref}(t)$ 与输出功率的采样值



$P_{DC}(t)$ 之差 ΔP_t , 即 $\Delta P_t = P_{ref}(t) - P_{DC}(t)$; 然后利用 PI 控制求出占空比的变化量 Δd ; 通过比较前一时刻和后一时刻的输出功率变化, 判断 $P(t)$ 和 $P(t-1)$ 的差值, 若二者差值大于零, 则表明仍然可以调节占空比。

3.2 恒压控制

光伏发电系统运行时, 光伏组件的输出电压为恒定值。假设在 t 时刻光伏组件的输出电流为 $I(t)$ 、输出电压为 $U(t)$ 、输出功率为 $P(t)$, 直流母线的采样电压为 $U_{dc}(t)$, 直流母线电压的参考值为 $U_{ref}(t)$, 则求出参考值与采样值的差值 $\Delta U = U_{ref}(t) - U_{dc}(t)$; 然后利用 PI 控制求出占空比的变化量 Δd ; 通过比较前一时刻和后一时刻的功率变化, 判断 $P(t)$ 和 $P(t-1)$ 的差值, 若二者差值大于零, 则表明仍然可以调节占空比^[9]。

3.3 MPPT 控制

MPPT 即最大功率点跟踪。由于光伏发电系统的输出特性容易受到外界环境的干扰, 如辐照度、温度、湿度等, 因此, 为了得到高效率的光伏发电系统, 需要对输出功率进行跟踪; 在光伏组件的输出特性曲线中, 在某一电压下可以得到最大输出功率, 该点称为最大功率点。在不同辐照度与不同环境温度下, 使光伏组件始终工作在最大功率点的技术叫做最大功率点跟踪技术。

3.4 多模式控制

目前对前级 DC/DC 变换器的理论研究中, 一般多是针对控制 DC/DC 变换器来实现最大功率点跟踪控制^[10-12]。按照《光伏电站接入电网技术规定》的要求, 大型光伏电站应实现有功及无功的控制, 这就使得光伏发电系统并不能始终进行最大功率点跟踪控制。进一步来说, 在构建交流微电网或直流微电网时, 在独立运行模式下, 根据能量平衡的需要, 光伏发电系统要工作于恒压模式或恒功率模式, 而仅依靠控制后级的 DC/AC 逆变器并不能实现恒压模式或恒功率模式, 所以根据需要, 前级 DC/DC 变

换器必须能支持直流模块式光伏发电系统运行于多种工作模式。

4 仿真结果

4.1 电路模型

图 6 为直流模块式光伏发电系统的电路模型。在光照条件下, 光伏组件输出功率, 光伏组件后接 DC/DC 半桥变换器, 通过 MPPT 控制输出, 观察最大功率点, 并通过 PWM 调制控制开关管的开通与关断。

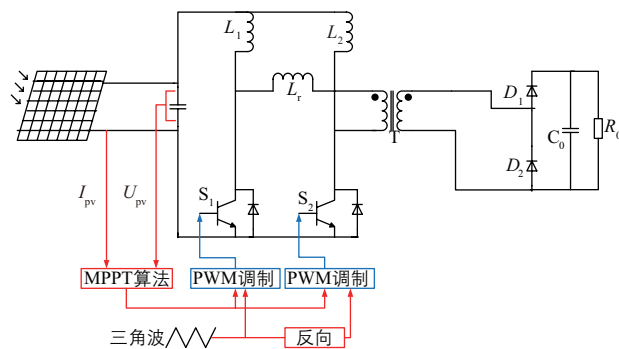


图 6 直流模块式光伏发电系统的电路模型

本文仿真采用基于扰动观察法的 MPPT 仿真模型, 仿真电路连接光伏组件及 DC/DC 变换器, 光伏组件所处环境温度为 25 °C, 光伏组件的输出端与变换器连接, 输出用 1 个负载表示, 通过示波器可以测量输出电压、输出电流的波形, 同时也可以测得光伏组件的 $I-V$ 特性及 $P-V$ 特性。

4.2 仿真模型

基于扰动观察法的 MPPT 仿真模型的输入为光伏组件的输出电压和输出电流, MPPT 算法的输入电压与输入电流通过 MPPT 模块, 输出占空比作为 PWM 的输入信号, 在 MPPT 的输入模块中, 通过扰动观察法, 在参数模块中给电路一个扰动, 此时可以通过函数来判断扰动的方向, 以此来追踪最大功率点。电路的初始占空比为 0.65, 最低占空比为 0.50, 设置最大占空比为 0.75。

仿真模型中光伏阵列参数如表 2 所示, 电路各元件参数如表 3 所示。

表 2 光伏阵列参数

参数	数值
最大功率 /W	288.5
输出电压最大值 /V	21.9
输出电流最大值 /A	16.7
辐照度 /W·m ⁻²	1000
环境温度 /℃	25

表 3 半桥变换器参数

元件参数	数值
$L_1/\mu\text{H}$	300
$L_2/\mu\text{H}$	300
$L_r/\mu\text{H}$	1
$C_o/\mu\text{F}$	100
R/Ω	250
$N_1:N_2$	1:5

4.3 仿真结果图

通过 Matlab/Simulink 仿真可以得到光伏组件的 I - V 特性和 P - V 特性曲线, 测试在环境温度为 25 ℃、辐照度为 1000 W/m² 情况下进行, 如图 7 所示。

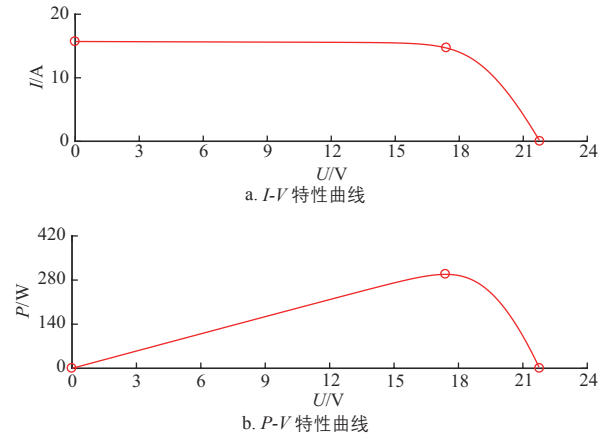


图 7 光伏组件 I - V 特性和 P - V 特性曲线

由图 7 可知, 光伏组件的输出电流基本保持在 16.7 A, 最大输出功率为 288.5 W, 在最大功率点处对应的输出电压约为 18 V。

图 8 为一天中在不同环境温度下光伏组件的 I - V 特性和 P - V 特性曲线。仿真中光伏组件的辐照度为 1000 W/m², 环境温度为 25 ℃。

由图 8 可知, 在辐照度不变的情况下, 当环境温度升高时, I - V 特性曲线会略微下移, 电流

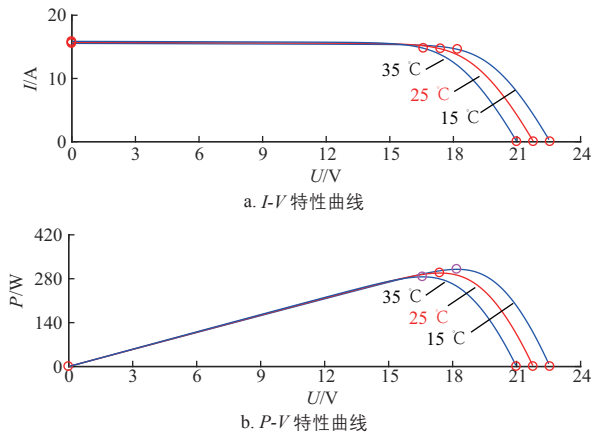


图 8 不同环境温度下光伏组件的 I - V 特性和 P - V 特性曲线会有所减小; 当环境温度降低时, P - V 特性曲线则会有所上移; 在同一电压下, 环境温度越低, 光伏组件的输出功率越大; 同样, 随着环境温度的降低, 同一功率所对应的输出电压会增加。

图 9 为 MPPT 控制图。从图中可以发现, 输出功率在变化一段时间后会趋于稳定, 稳定值约为 288.5 W。

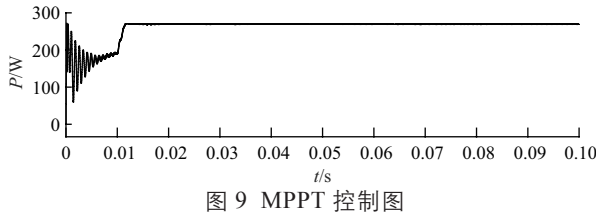


图 9 MPPT 控制图

图 10 为 MPPT 控制下的输出电压波形图。从图中可以看出, 电压经过短暂的调整最终会趋于稳定, 稳定值约为 18 V。

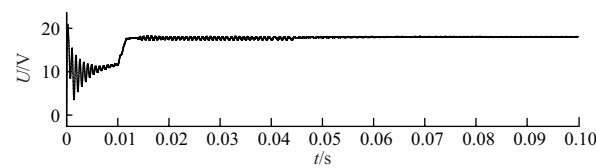


图 10 MPPT 控制下输出电压波形图

图 11 为 MPPT 占空比波形图。从图中可以看出, 占空比随着光伏组件的发电情况而自动变化, 最终工作在最大功率点处, 此时占空比约为 0.6。

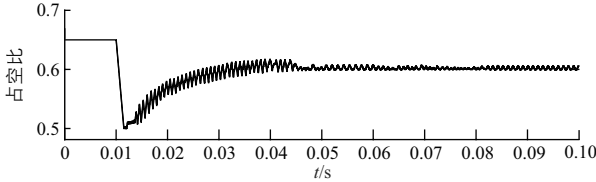


图 11 MPPT 占空比波形图

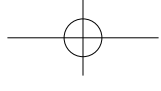


图12为DC/DC变换器的输出电压波形图。从图中可以看出,其输出电压基本上趋于210 V。

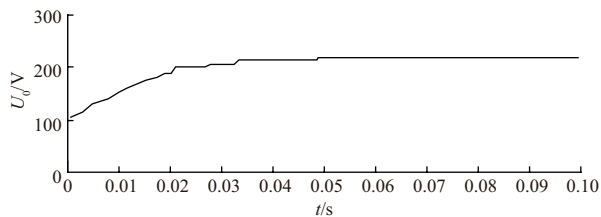


图12 负载输出电压波形图

经过仿真验证达到了预期的效果,验证了变换器的可行性。

5 结论

本文对DC/DC变换器进行了分析,并对比了采用这种变换器的光伏发电系统的结构及性能;介绍了变换器的运行控制,并通过理论与仿真验证得到如下结论:实验选用的隔离型电流馈电变换器能够较好地实现高电压增益和高效率,在运行控制仿真时,选用扰动观察法能够很好地观测输出功率,从而得到预期的效果,验证了变换器的可行性,具有较大的应用前景。

(接第73页)

5 结论

太阳能供热采暖系统中太阳能集热器的设计,在遵循GB 50495-2009《太阳能供热采暖工程技术规范》时,实际上隐含了一个基本的前提条件,即目标建筑物有足够的空间供设计出的太阳能集热器系统进行安装。但在实际工程应用中经常遇到的情况是安装场地和空间已被限定,本文针对这种限定了安装场地和空间的情况,提出了太阳能集热器阵列的设计方法。其具有以下优点:

1) 设计出的太阳集热器阵列形式为最优化的方式,得出的集热器安装数量为限定场地和空间条件下的最大可安装量。

参考文献

- [1] Guo S Q, Li Y F. Design of high power converter based on phase-shifted full-bridge ZVS soft switching[J]. Journal of Shaanxi University of Technology (Natural Science Edition), 2018, (1).
- [2] Rehman Z, Al-Bahadly I, Mukhopadhyay S. Dual input-dual output single inductor dc-dc converter for renewable energy applications[A]. 4th International Conference on Renewable Energy Research and Applications[C]. Palermo, Italy, 2015.
- [3] 史永胜,李娜,王雪丽.基于电流馈入型半桥变换器光伏阵列MPPT仿真[J].实验室研究与探索,2017,(11):94-97.
- [4] 甘鸿坚.小容量高输入电压直-直变换器研究[D].南京:南京航空航天大学,1999.
- [5] 梁超辉.直流模块式光伏发电系统拓扑及控制研究[D].武汉:华中科技大学,2008.
- [6] 童一宁,黄晋劲.用于光旁路保护设备的供电模块[P].中国:CN202183633U,2012.
- [7] 蔡彬,武玉强,褚晓广,等.一种基于直流光伏模块的光伏发电系统拓扑结构[P].中国:CN 104682859 A,2015.
- [8] 王自满.直流母线式光伏发电系统前级DC/DC变换研究[D].天津:天津大学,2013.
- [9] 熊远生,俞立,徐建明.光伏发电系统多模式接入直流微电网及控制方法[J].电力系统保护与控制,2014,(12):37-43.
- [10] 王丰,吴新科, Lee F C,等.嵌入式智能光伏模块的最大功率输出统一控制[J].中国电机工程学报,2013,33(21):81-89.
- [11] 王盼宝,王卫,吴炎.光伏发电系统中无电流传感器型MPPT控制策略[J].电力自动化设备,2014,34(10):64-68.
- [12] 邓红霞.高电压增益MPPT控制器的研究[J].电力电子技术,2014,48(12):83-85. 太阳能

2) 本文提出的方法,实际上是针对限定场地和空间条件下太阳集热器设计的一种算法,为太阳能集热器阵列设计的标准化及软件化奠定了基础。

参考文献

- [1] 郑瑞澄,袁莹,王国栋,等.民用建筑太阳能热水系统工程技术手册[M].北京:化学工业出版社,2006,1-53.
- [2] J.A. 达菲, W.A. 贝克曼[著], 陆维德, 葛新石, 等[译]. 太阳能——热能转换过程[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
- [3] 白录江. 被动式太阳房热工设计手册[M]. 兰州: 甘肃自然资源研究所, 1983.
- [4] 中国太阳能学会, 太阳能热利用的理论基础[Z].
- [5] GB 50495-2009, 太阳能供热采暖工程技术规范[S].
- [6] 王炳忠. 太阳辐射能的测量与标准[M]. 北京: 科学出版社, 1993. 太阳能