

激光辐照单晶硅光伏电池温度场模拟

陈健斌

(东华大学 环境科学与工程学院, 上海 201620)

摘要: 激光无线传能由于其具有紧凑性与高能流密度的特点, 在远场无线电力传输中发挥着重要的作用。光伏接收器是激光无线传能的重要组成部分, 激光辐照下的光伏电池温度场对其实际运行特性具有重要作用。本文利用光伏电池的五参数模型与节点能量平衡定律求解了高斯光斑辐照下光伏电池的温度场, 并实现了任意光照条件下电学与热学耦合求解。研究发现非均匀光照对单块光伏电池的影响较小, 而散热是实现大功率激光无线传能的一大瓶颈, 因为温度对光伏电池的输出特性影响较大。

关键词: 激光无线传能; 数值模拟; 光伏电池; 非均匀光照

中图分类号: TN 249

文献标志码: A

Temperature Field Simulation of Laser Irradiated Monocrystalline Silicon Photovoltaic Cells

CHEN Jianbin

(College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: Laser wireless energy transfer plays an important role in far-field wireless power transmission due to its compactness and high energy flow density. The PV receiver is an important component of laser wireless energy transfer, and the temperature field of the PV cell under laser irradiation plays an important role in its actual operating characteristics. In this paper, the temperature field of PV cell under Gaussian spot irradiation is solved by using the five-parameter model of PV cell and the nodal energy balance law, and the coupled electrical and thermal solutions are realized under arbitrary illumination conditions. It is found that the effect of non-uniform illumination on a single PV cell is small, while heat dissipation is a major bottleneck for realizing high-power laser wireless energy transfer, because the temperature has a large impact on the output characteristics of the PV cell.

Key words: Laser Wireless Energy Transfer; Numerical Simulation; Photovoltaic Cell; Non-Uniform Illumination

随着光伏技术与高功率激光器技术的不断发展, 利用激光传输能量的无线传能技术已愈具有实用价值。激光器良好的单色性、方向性、高能流密度等特性使其能够以较小的接收器面积实现高功率、远距离的电力传输, 可应用于室内设备的无线充电^[1], 无人机供能^[2], 灾后应急电网^[3]等领域, 具有广阔的应用前景。

激光无线传能最重要的两个部件即为激光器与光伏电池, 激光器发出的激光可近似看作高斯光斑, 而光伏电池在非均匀光照下必然具有非均匀的温度分布, 温度会影响光伏电池实际的光电转化效率, 对系统的整体输出会产生影响。光伏电池未转化为电的部分几乎全部转化为热能, 因此分析光伏接收器在激光辐照下的运行规律是很有必要的。本文拟基于光伏电池的五参数模型, 对单块硅光伏电池进行离散处理, 在固定偏置电压下分析该单块电池的温度场, 并分析光斑非均匀性对系统输出的具体影响, 如工作电流、效率、填充因子等。

1 发电特性和温度模型

1.1 高斯光斑

激光无线传能所用到的激光器为半导体激光器，经光纤耦合并准直后输出的光斑可近似为高斯分布。其能量分布的数学表达式为：

$$G_r = G_0 \times e^{-\frac{r^2}{w_0^2}} \quad (1)$$

其中， G_0 为光束中心的光强， r 为光斑上任意一点与光斑中心的距离，在以光斑中心为原点的直角坐标系中， $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ ， w_0 为光斑半径，定义为光强下降到中心光强的 $1/e$ 时的位置。其任意过光束中心的截面可由图 1 表示。

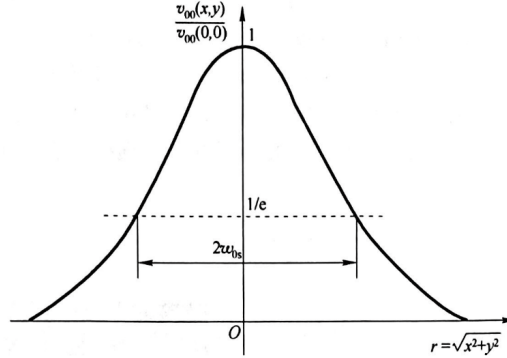


图 1 高斯分布与光斑尺寸

Fig. 1 Gaussian distribution and light spot size

1.2 光伏电池等效电路模型

激光无线传能的一大优势之一就是光伏电池在其带隙能量所对应波长附近具有较高的光电转化效率^[4]，常见的光伏电池光谱响应曲线如图 2 所示^[5]：

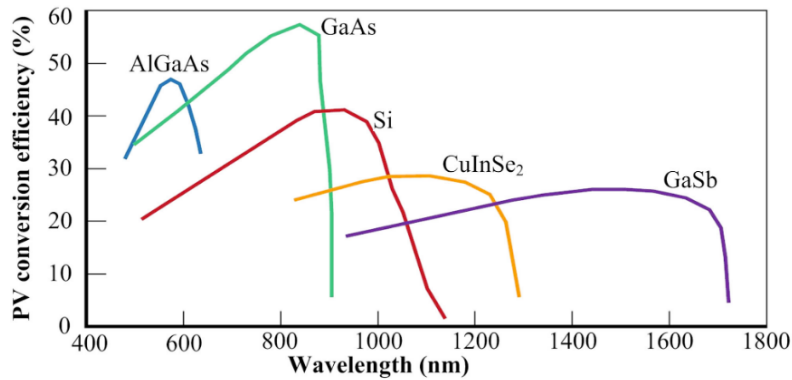


图 2 常用光伏材料的光谱响应

Fig. 2 Spectral response of commonly used photovoltaic materials

由图 2 可以看出，对于最为常见的单晶硅光伏电池，在 900-1000nm 的光谱波段的光电转换效率可以达到 40%，而该波段内半导体激光器电光转化效率已能达到 70%，因此对于远场无线电力传输，激光无线供电具有显著优势。

本次光伏电池的仿真采用业内最为常用的五参数模型，即把光伏电池看作是由理想电流源、二极管、串联电阻、并联电阻组成的电路模型，并利用外量子效率 (EQE) 来求解光生电流，其等效电路模型如图所示：

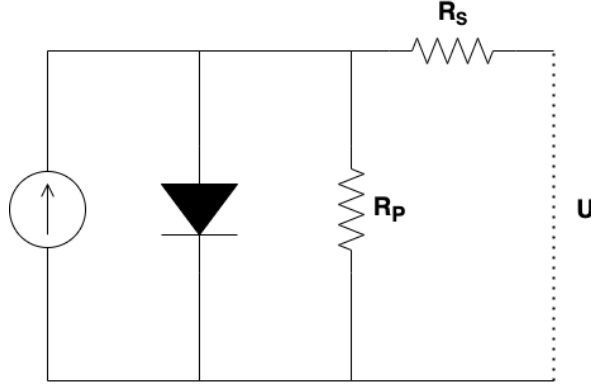


图 3 光伏电池等效电路图

Fig. 3 Photovoltaic Cell Equivalent Circuit Diagram

理想电流源采用外量子效率计算短路电流，量子效率定义为入射光谱的每个光子在太阳电池外部电路中产生的电子数，而外量子效率考虑了由于反射所损失的光子，对于激光光伏电池来说，其短路电流密度可由下式表示：

$$J_{sc} = EQE \cdot q \cdot \phi_0 \quad (2)$$

其中， J_{sc} 为短路电流密度，单位 A/cm^2 ；对于单晶硅电池来说，在 940nm 下 EQE 约为 0.8； q 为单个电子电量，为 $1.602 \times 10^{-19}C$ ； ϕ_0 为光子通量，单位为个 $/cm^2$ ，可由下式计算：

$$\phi_0 = \frac{G_r \lambda}{hc} \quad (3)$$

其中， G_r 为投入辐射，单位 W/cm^2 ； λ 为激光波长，单位 m； h 为普朗克常量， $h = 6.626 \times 10^{-34} J \cdot s$ ； c 为光速， $c = 2.998 \times 10^8 m/s$ 。

对于硅电池来说，暗饱和电流密度 $J_0 = 1 \times 10^{-12} A/cm^2$ ，假设其串联电阻 $R_s = 0.01\Omega$ ，并联电阻为 $R_p = 1000\Omega$ 。则在偏置电压为 V 的情况下，光伏电池的输出特性可表示为下式：

$$I = I_L - I_0 \left(e^{\frac{V+IR_s}{nV_T}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (4)$$

其中， I_L 为光生电流，由于暗电流的数量级很小，故可近似认为 $I_L \approx I_{sc} = J_{sc}A$ ； I_0 为暗饱和电流， $I_0 = J_0A$ ； n 为二极管理想系数，取 $n = 1.1$ ； V_T 为热电压， $V_T = \frac{kT}{q}$ ， k 为玻尔兹曼常数， $k = 1.381 \times 10^{-23} J/K$ 。上式为超越方程，可利用牛顿迭代法求解。

1.3 光伏电池温度模型

光伏电池的工作温度主要影响其热电压、暗饱和电流，从而对光伏电池的输出曲线造成影响，暗饱和电流关联式如下列表达式所示^[6]：

$$\frac{I_0}{I_{0,ref}} = \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left(\frac{E_g}{V_T} - \frac{E_{gr}}{V_{Tr}} \right) \quad (5)$$

其中， E_g 为材料的能带宽度。而 E_g 也表现出温度依赖性，它可以用下述方程描述：

$$\frac{E_g}{E_{g,T_{ref}}} = 1 - 0.0002677(T - T_{ref}) \quad (6)$$

对于硅电池， $E_{g,T_{ref}}$ 在 $T_{ref} = 25^\circ C$ 时的典型值时1.121eV。

2 温度场计算模型

2.1 物理模型

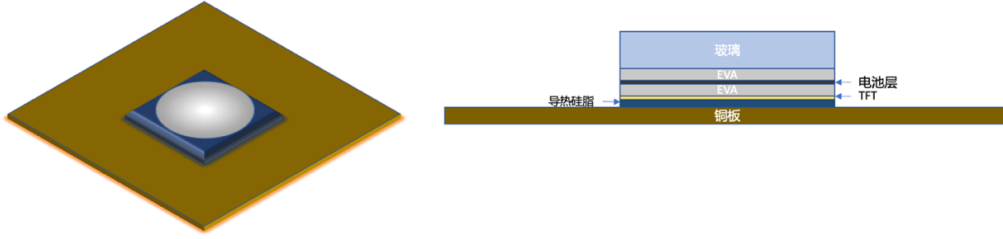


图 4 物理模型示意图

Fig. 4 Physical model schematic

本仿真模型如图 3 所示，单晶硅电池由玻璃，EVA 层，电池层，TPT 层组成，通过导热硅脂与铜板底板相连接，单晶硅电池尺寸为 $40\text{mm} \times 40\text{mm}$ ，居中放置在 $100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 的铜板上。光伏接收器竖直放置在光学平台上的平板夹具上，光斑半径为 2cm ，令光斑中心位置位于光伏电池中心，使其内切与光伏电池，模型参数如表 1 所示^[7]：

表 1 光伏电池模型参数

Table 1 Photovoltaic cell model parameters

结构	厚度/mm	热导率/ $(\text{W} \cdot (\text{K} \cdot \text{m})^{-1})$
玻璃	3	0.98
EVA	0.5	0.23
电池层	0.2	148
EVA	0.5	0.23
TPT	0.1	0.61
导热硅脂	0.25	5
铜片	1	384

2.2 传热模型

光与物质的相互作用有吸收、反射与透射三种基本过程，由于硅光伏电池对 940nm 激光的吸收系数较高，可近似认为无透射光。除一部分光在表面被反射以外，进入光伏电池的能量不能转化为电能的部分均转化为热能^[8]。在本传热模型中为简化求解过程，做出以下假设：

- (1) 玻璃与 EVA 均为理想透明介质，其透射率等于 1，光全部在电池层吸收。
- (2) 光伏电池所产生的热能考虑为电池层的内热源，均匀分布于电池层中。
- (3) 将光伏电池电池层离散成二维的若干节点，认为节点内部温度均匀。
- (4) 由于其他层内导热系数较小，忽略其他层横向导热，仅计算电池层内二维温度场。
- (5) 由于自然对流涉及到温度与对流换热系数的耦合，为避免问题复杂化，简化计算，认为铜片与玻璃边界的对流换热系数为常数。
- (6) 忽略边界节点传热，即边界为绝热边界条件。
- (7) 忽略各层之间的接触热阻。
- (8) 由于硅光伏电池与环境温差不大，忽略辐射换热。
- (9) 定义一维等效热阻对铜片进行热分析^[9]，利用扩散热阻简化计算。
- (10) 电学模型与热学模型解耦，分开求解。

采用内节点法将光伏电池中电池层离散成 40×40 个内部节点，由于二维边界为绝热边界条件，因此无需划分边界节点，截面的节点热阻网络图如下图所示：

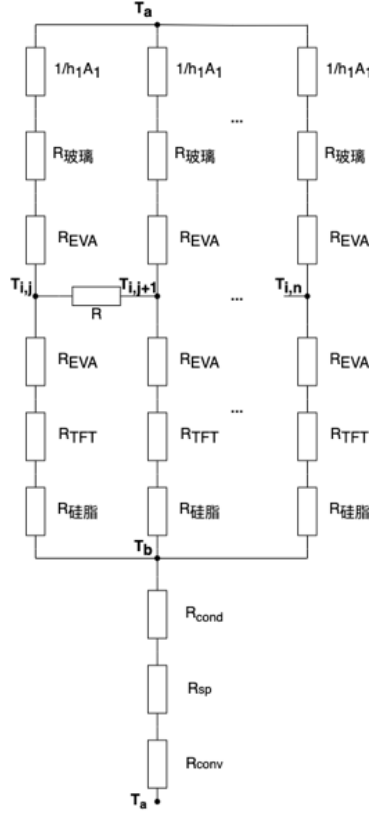


图 5 节点热阻网络图

Fig. 5 Node thermal resistance network diagram

2.3 节点方程

由假设可知，节点内热源可由下式表示：

$$\Phi_{i,j} = \frac{G_{i,j} \times A \times (1 - R) \times (1 - Eff_{i,j})}{A \cdot \delta} \quad (7)$$

对于涂有防反射涂层的硅电池来说，其反射率为 10% ^[10]。对于稳态计算来说，由于本文所述物理问题更适用于节点能量平衡法，因此仅在二维平面采用中心差分格式，假设向上传导的热量记为 Q_u ，向下传导的热量为 Q_d ，则内部节点方程可列为：

$$\Phi_{i,j} \cdot A \cdot \delta + \lambda A_i \frac{T_{i+1,j} - 2T_{i,j} + T_{i-1,j}}{\Delta x} + \lambda A_j \frac{T_{i,j+1} - 2T_{i,j} + T_{i,j-1}}{\Delta y} + Q_{u,i,j} + Q_{d,i,j} = 0 \quad (8)$$

对于边界节点来说，考虑到边界绝热，需对节点方程做一定的修正，篇幅限制不再重复介绍。式中 $A_i = \Delta y \cdot \delta$, $A_j = \Delta x \cdot \delta$, $A = \Delta x \cdot \Delta y$; $Q_{u,i,j}$ 和 $Q_{d,i,j}$ 可由下式计算。

$$Q_{u,i,j} = \frac{T_a - T_{i,j}}{R_{EVA} + R_{玻璃} + \frac{1}{h_1 A}} \quad (9)$$

$$Q_{d,i,j} = \frac{T_b - T_{i,j}}{R_{EVA} + R_{TFT} + R_{硅脂}} \quad (10)$$

其中， T_b 为导热硅脂与铜片交界面的温度，其仍为未知量，故需补充关于 T_b 的节点方程，由节点能量平衡方程可知：

$$\sum_{i=1}^{40} \sum_{j=1}^{40} Q_{dij} = \frac{T_b - T_a}{R_{cond} + R_{sp} + R_{conv}} \quad (11)$$

上述公式利用了扩散热阻的概念^[11]简化计算，认为铜片总热阻是一维导热热阻、铜片的扩散热阻和对流传热热阻之和，热源尺寸 L_1 为 4cm，铜板尺寸 L_2 为 10cm，其具体表达式如下：

$$R_{tot} = \frac{\delta}{\lambda L_2^2} + R_{sp} + \frac{1}{h L_2^2} \quad (12)$$

$$R_{sp} = \frac{\left(\frac{\lambda}{h}\right) \left(\frac{\pi^2}{L_2} + \frac{1}{L_1}\right) + \tanh \left[\left(\frac{\pi^2}{L_2} + \frac{1}{L_1}\right) \delta \right]}{1 + \left(\frac{\lambda}{h}\right) \left(\frac{\pi^2}{L_2} + \frac{1}{L_1}\right) \times \tanh \left[\left(\frac{\pi^2}{L_2} + \frac{1}{L_1}\right) \delta \right]} \times \frac{\left(1 - \frac{L_1}{L_2}\right)^{\frac{3}{2}}}{2\lambda L_1} \quad (13)$$

取空气自然对流换热系数 $h = 15W/(m^2 \cdot K)$ ，代入上式计算铜片总热阻 $R_{tot} = 6.8537K/W$ ，各部分热阻中，导热热阻 $R_{cond} = 0.00026K/W$ ，扩散热阻 $R_{sp} = 0.1868K/W$ ，对流换热热阻 $R_{conv} = 6.67K/W$ ，由以上数据可以看出不良的对流换热条件使其占据热阻的主要地位，故在实际应用中应尽可能提高对流换热系数。

3 模型求解与结果讨论

由于温度场与光伏转化效率具有耦合性，故在实际模型求解中应将其解耦合作迭代求解，具体程序框图如下图所示：

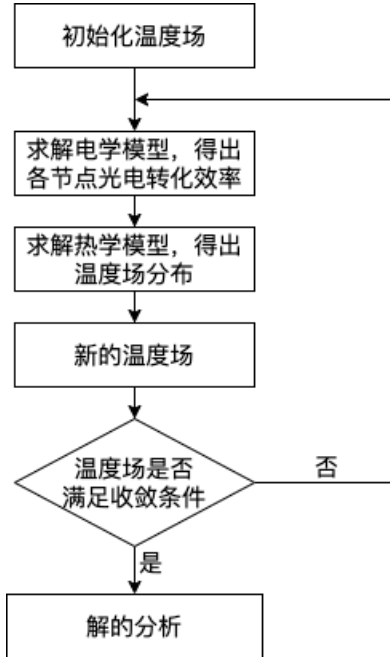


图 6 数值求解程序框图

Fig. 6 Block diagram of the numerical solution program

在实际求解中，最佳偏置电压也与温度场相耦合，使其问题较难求解，为简化分析过程，本次模拟以一次迭代为例，对比高斯光斑与均匀光照下光伏电池输出特性。

首先初始化温度场，默认在高斯光斑辐照下电池温度与环境温度相同，即 $T=298.15K$ ，得出各子模块的辐照场，改变偏置电压进行最大功率点扫描，偏置电压从 0 到模块最大开路电压线性划分 100 个节点，从而找到最大功率点，并记录该偏置电压下模块光电转化效率，从而计算热学模型中内热源强度。

当光斑中心光强 $G_0 = 1W$ ，光斑半径 $w = 2cm$ 时，光伏电池面积内总入射光强 $G_{in} = 8.9258W$ ，在该光照条件下光伏电池输出曲线如下图所示：

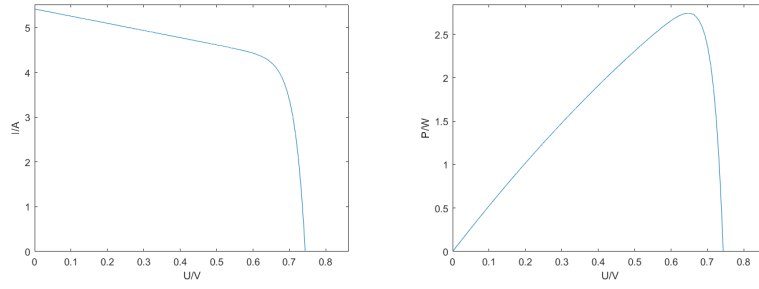
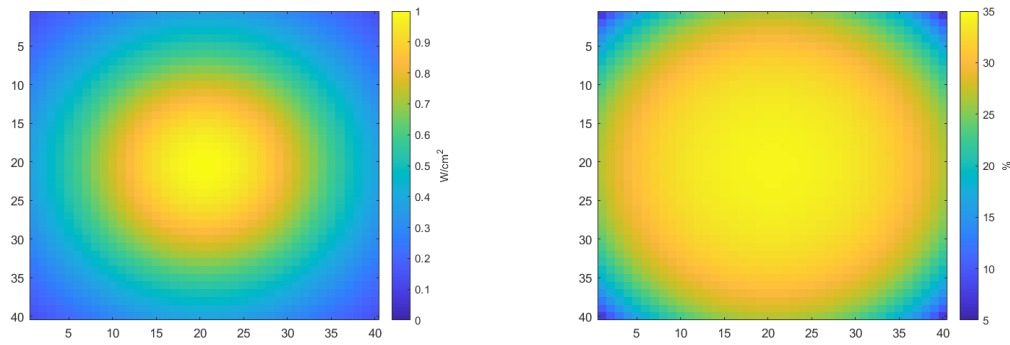


图 7 激光辐照下光伏电池特性曲线

Fig. 7 Photovoltaic cell characteristic curve under laser irradiation

由曲线数值解分析可得其最大功率点的偏置电压 $V_m = 0.6735V$ ，其光伏电池片入射辐射与光电转化效率如下图所示：



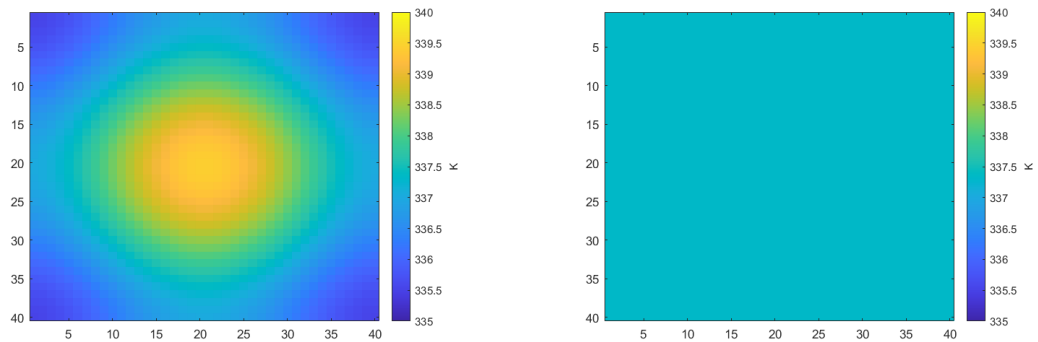
(a) 入射辐射 G

(b) 最大功率点下的光电转化效率

图 8 激光辐照下光伏电池光电转化特性

Fig. 8 Photoelectric conversion characteristics of photovoltaic cells under laser irradiation

根据以上信息便可将其电学模型代入到温度场模型中进行迭代求解，将电池温度初始化为 75°C ，铜板交界面温度为 60°C ，环境温度恒为 25°C ，空气自然对流换热系数 $h = 15\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ，当迭代到 4247 次时，温度场与上一次迭代标准差和小于 10^{-3} ，故认为解已收敛。利用同样的方法以及相同的投入辐射，对均匀光照下的温度场进行求解，温度场分布如图 9 所示：



(a) 高斯光斑下温度场

(b) 均匀光照下温度场

图 9 不同光照条件下光伏电池温度场分布

Fig. 9 Temperature field distribution of photovoltaic cells under different lighting conditions

将其温度场带回电池模型中，则可得出一次迭代后的光伏电池特性，由于光电转化效率对温度场的影响

相对较小，一次迭代后的光伏电池特性已较能反映其实际工作特性。经测试，多次迭代后与单次迭代的光伏特性曲线已无明显差别，故利用其一次迭代结果做结果分析。

表 2 不同工况下光伏电池输出特性

Table 2 PV cell output characteristics under different operating conditions

特性参数	均匀光照 (25°C)	均匀光照 (实际)	高斯光斑 (25°C)	高斯光斑 (实际)
光电转化效率 $E_{ff}/\%$	30.72	26.96	30.72	26.95
开路电压 V_{oc}/V	0.7433	0.6552	0.7475	0.6587
短路电流 I_{sc}/A	5.4138	5.4138	5.4138	5.4138
最大输出功率 P_m/W	2.7421	2.4061	2.7422	2.4057
最大功率点电压 V_m/V	0.6457	0.5559	0.6473	0.5568
最大功率点电流 I_m/A	4.2469	4.3279	4.2361	4.3205
填充因子 FF	0.6815	0.6783	0.6776	0.6747

由上表可以看出，在单块光伏电池且每个模块偏置电压相同的条件下，非均匀辐照对光伏电池的影响很小，其主要原因是本模型中考虑的是各模块的并联连接，而在实际使用中为达到工作电压，单块光伏电池模块常通过串联的形式来提高电压，在非均匀光照下将受电流最小的模块影响从而大大降低光电转化效率；同时也可以看出当温度上升时，开路电压下降较快，同时也伴随着最大输出功率的下降，故增强光伏电池的散热是很有必要的，考虑到更高功率的激光传能应用，散热是一个不可忽略的问题。

4 结论

本文通过 MATLAB 软件对光伏电池的热电耦合系统特性进行了研究，考虑了实际工况下光伏电池的传热模型，建立了基于节点能量平衡的离散方程，通过迭代求解得出了激光辐照下光伏电池的温度场，并与电学模型耦合求解，得到经温度修正后的光伏电池输出曲线，最后分析了高斯光斑下和均匀光照下电池的特性参数。本文得出以下结论：

- 1) 考虑无串联的单块单晶硅光伏电池，非均匀光照对其输出特性影响较小。
- 2) 激光无线传能应用中光伏电池的散热会成为一个限制传输功率的一个问题，温度上升会造成较大的功率损失。
- 3) 温度场与发电特性曲线的耦合求解经一次迭代后即接近实际特性曲线，多次迭代后曲线形状基本不变。

参考文献

- [1] The Wireless Power Company[EB/OL]/Wi-Charge. [2022-06-11]. <https://www.wi-charge.com>.
- [2] 崔子浩, 华文深, 李刚, 等. 无人机激光无线能量传输及跟踪瞄准方法研究[J]. 激光与红外, 2018, 48(3): 275-279.
- [3] PowerLight Technologies[EB/OL]. [2022-06-11]. <https://powerlighttech.com/>.
- [4] Ke Jin, Weiyang Zhou. Wireless Laser Power Transmission: A Review of Recent Progress[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(4): 3842-3859.
- [5] Krupke W F. DPAL: A new class of lasers for cw power beaming at ideal photovoltaic cell wavelengths[C]//AIP Conference Proceedings: Vol. 702. Sendai (JAPAN): AIP, 2004: 367-377.
- [6] 翟载腾. 任意条件下光伏阵列的输出性能预测[D]. 中国科学技术大学, 2008.
- [7] 王立舒, 李欣然, 房俊龙, 等. 非聚光光伏-热电耦合系统表面换热影响分析及模型验证[J]. 农业工程学报, 2021, 37(23): 200-208.
- [8] Sivaram V. Taming the sun: innovations to harness solar energy and power the planet[M]. Cambridge, MA: The MIT Press, 2018.
- [9] Shabany Y. Heat Transfer: Thermal Management of Electronics[M]. 1st ed. CRC Press, 2009.
- [10] Castañer L, Silvestre S. Modelling Photovoltaic Systems Using PSpice®[M]. 1st ed. Wiley, 2002.
- [11] 周文杰. 铜质均热板制造工艺及其传热性能分析[D]. 华南理工大学, 2015.