

多镜面直线布置的聚光型太阳能光伏系统的研究

杨金付

合肥工业大学电气与自动化工程学院, 合肥 (230009)

E-mail: yjfu-12@tom.com

摘要: 本文讨论了多平面镜作直线布置的聚光器设计原理, 给出了单镜面的面积计算方法和平面镜二维旋转角度的计算方法, 并分析了在太阳能电池接收最佳光强 E_m 可获得最佳发电量控制策略要求。实验采用九平面镜构成抛物面聚光器, 使太阳能电池接收额定光强的五倍左右, 在太阳能电池标准配置下极大地提高了光伏系统的输出功率。

关键词: 多平面镜, 聚光器, 光伏, 最佳发电量

1. 前言

太阳能光伏发电技术是最有应用前景的太阳能利用方式^[1]。光伏发电作为社会整体能源结构的组成部分所占比例尚不足 1%, 造成这种状况的主要原因是光伏发电的成本太高^[2]。改进电池制造工艺、采用新技术提高转换效率, 可以降低光伏发电的成本, 但步伐比较缓慢^[3]。对常规太阳能电池进行聚光, 可以提高单位面积太阳能电池的输出功率。一定程度上克服了太阳能量的分散性 (约 1kW/m^2), 大大降低光伏发电的成本, 具有很好的应用前景^[2]。目前, 国内外大多数研究活动集中在抛物柱曲面反射镜或 Fresnel 透镜聚光系统以及聚光电池的研究开发上。但抛物柱面和 Fresnel 透镜曲面加工难度大, 精度低, 费用高和产品寿命短^[4]; 聚光电池技术还在实验室研究阶段^[5]。

本文讨论了多平面镜直线布置构成聚光器设计原理, 给出了单镜面的面积计算方法和平面镜二维旋转角度的计算方法, 并分析了在太阳能电池接收最佳光强 E_m 可获得最佳发电量控制策略要求。旨在采用多镜面聚光于光伏电池表面, 以经济实用的方法使光伏电池产生获得最佳的光伏效率, 降低光伏发电系统成本。

2. 多镜面聚光型太阳能光伏系统的基本组成

本文讨论的多镜面聚光型太阳能光伏系统, 其框图如图 1 所示:

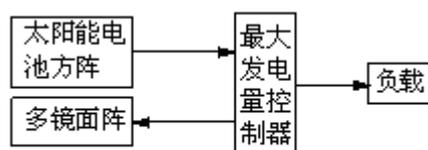


图1 多镜面聚光型光伏发电系统框图

Fig.1 The diagram of solar energy photovoltaic system in multi-glass focusing solar radiation

太阳能电池阵列由太阳能电池组件和支架组成。布置在多平面镜直线布置构成的聚光器的前方, 背面朝着正南方, 接收多镜面反射的太阳光线, 将光能转化为电能。

多镜面阵由多平面镜和伺服驱动支架组成。多平面镜直线布置构成聚光器, 每个镜面可以作方位角和高度角两轴运动, 将接收的太阳光反射聚焦到太阳能电池阵列表面。通过控制镜面的数量和位置来控制太阳能电池表面获得的光强, 使太阳能电池表面的光强达到在一定条件下所承受的光强为最佳光强 E_m 。

最大发电量控制器是根据太阳能电池阵列在某一温度和太阳光强条件下, 确定此时太阳能电池发电量是否可以带动跟踪太阳和增加平面镜数聚光时所消耗的能量, 如果达到一定的

发电量后，能达到较好的效果后，如果再增加光强收效很小，反而会增加成本。即是让太阳能电池承受最佳的光强的条件下，再寻求 MPPT 的效果。

3. 多平面镜系统单个平面镜大小与角度位置计算

3.1 多平面镜系统单个平面镜大小的理论计算

不管是采用反射式还是透射式方法，其实质都是非成像聚光，即仅要求将太阳光均匀汇聚在一个较小的区域面积内，而非一个焦点或一条焦线上。这就是聚光器在实际应用中的特点。正是这个特点从而为改进聚光器结构，降低生产成本提供了可能性。

太阳能电池背面朝南垂直固定安放，一个多平面镜组成的聚光器反光面朝南，正对着太阳能电池正面一字排开布置，各平面镜根据太阳位置的变化作出适当的转动，要求将反射的太阳光均匀汇聚在太阳能电池 $W \times L$ 区域面积即可，其中： W 为太阳能电池面宽度， L 为太阳能电池面长度。

首先计算单个平面镜的长度 L_d 。设定太阳能电池阵列的长度为 L ，多平面镜所处的直线设为 x 轴(东西方向，西向为 x 轴正向)，太阳能电池阵列垂直于坐标轴 y (南北方向，南向为 x 轴正向)， z 轴为上下方向，向上为 z 轴正向，其中太阳能电池阵列的中心位置为 $(0, y_1, z_1)$ ，某块平面镜的中心位置为 $(x_1, y_1, 0)$ ，相对于 x 轴的倾斜角为 α_1 ，太阳光对平面镜的入射角为 θ_1 ，反射角为 θ_2 。太阳能光伏发电系统单个平面镜与光伏电池阵列布置的俯视光路示意图如图2所示。

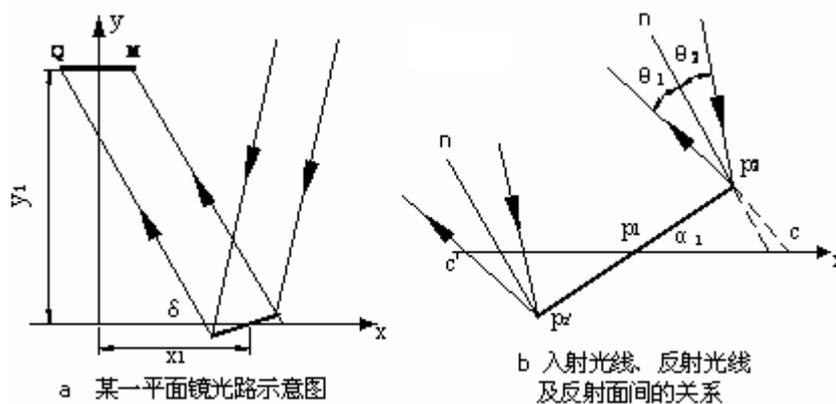


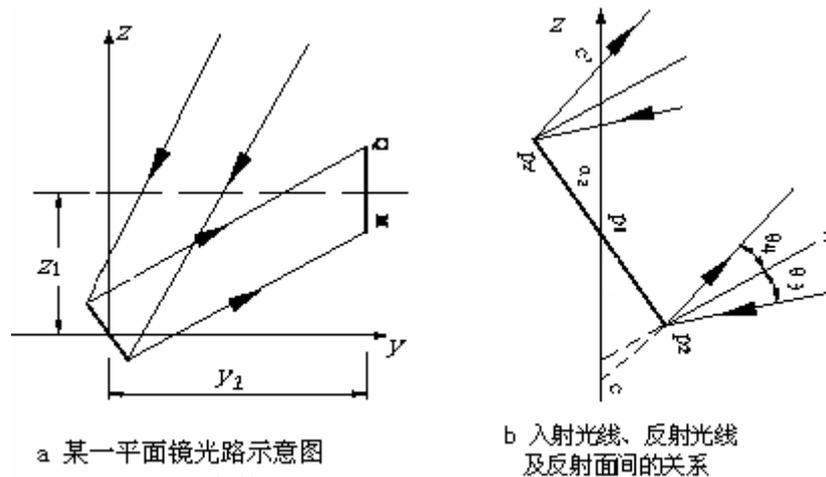
图2 直线平面镜聚光系统俯视光路图

Fig.2 The light path planform in multi-glass of linear pattern

从图上可以得到半个平面镜、横坐标及反射光线的延长线组成的 $\triangle P_1P_2C$ 为钝角三角形（其中， $\angle P_1P_2C = 90^\circ + \theta_1 > \pi/2$ ），有 $\angle P_1P_2C \geq \angle P_2CP_1$ ，所以平面镜的长度 L_1 小于或等于 P_1C 的长度，因平面镜可旋转 180° ，当平面镜水平放置时， $\angle P_1P_2C = \angle P_2CP_1 = 0$ ，反射的太阳光刚好照在太阳能电池阵列的长度上，所需要的平面镜最长，长度 $L_1 = P_1C = L/2$ （即线段 P_1P_2 与线段 P_1C 重合）；当维持 P_1C 不变时，随着倾角 α_1 的增大，长度为 L 的平面镜所反射的太阳光的分布区域将超出太阳能电池阵列受光区 QM 以外。同理，另半个平面镜的最大长度 $L_2 = P_1C' = L/2$ 。可得，只要平面镜水平放置时，保证平面镜的反射光的分布区域可以包含整个太阳能电池阵列的受光区 QM ，就可以保证平面镜在任何倾斜角度下的反射光的分布区域都可以包含整个太阳能电池阵列的受光区 QM ，而在水平放置时平面镜长度等于太阳能电池板的长度，所以取 $L_d = L$ 。

再计算单个平面镜的宽度 W_d 。设定太阳能电池阵列的宽度为 W ，多平面镜所处的直线

设为x轴，其中一个平面镜的中心投影于yoz平面在原点位置，相对于z轴的倾斜角为 α_2 ，太阳光对平面镜的入射角为 θ_1 ，反射角为 θ_2 ，太阳能电池阵列在zoy平面的投影坐标位为 (z_1, y_1) 。太阳能光伏发电系统单个平面镜与光伏电池阵列布置的侧视光路示意图如图3所示。



a 某一平面镜光路示意图

b 入射光线、反射光线及反射面间的关系

图3 直线平面镜聚光系统侧视光路示意图

Fig.3 The light path side view planform in multi-glass of linear pattern

根据图3，将太阳能电池阵列平移到平面坐标原点出，可得，当平面镜的上边缘和下边缘分别与太阳能电池阵列的上边缘和下边缘连接时的连线垂直于平面镜时，所需要的平面镜宽度 W_d 最小。当平面镜水平放置时，所需要的宽度 W_d 最大，最大值为 $W_d = W \times \frac{y_1}{z_1}$ 。

结论1. 多镜面作直线布置构成的聚光器中，每个平面镜与太阳能电池阵列长度L相等，每个平面镜宽度 W_d 最大值等于太阳能电池阵列宽度W乘以 $\frac{y_1}{z_1}$ 。

3.2 平面镜角度位置的计算

假设太阳的方向角为 γ_s ，高度角为 α 。先计算平面镜面与x轴正向之间的夹角 α_1 。如图2所示，设平面镜的中心与太阳能电池阵列中心的水平距离和垂直距离为 x_1 、 y_1 ，则平面镜反射光线与x轴的夹角 δ_1 为：

$$\delta_1 = \text{tg} \frac{y_1}{x_1} \quad (1)$$

则太阳光的入射角与反射角为 θ_1 、 θ_2 为：

$$\theta_1 = \theta_2 = 90^\circ - (\alpha_1 + \delta_1) = 90^\circ - (\gamma_s - \alpha_1) \quad (2)$$

由(2)式，计算可得平面镜面与x轴正向之间的夹角 α_1 为：

$$\alpha_1 = \frac{\gamma_s - \delta_1}{2} = \frac{1}{2} \left(\gamma_s - \text{tg} \frac{y_1}{x_1} \right) \quad (3)$$

再计算平面镜面与z轴正向之间的夹角 α_2 。根据图3，设平面镜中心与太阳能电池阵列中心的水平距离为 y_1 、高度差为 z_1 ，则

$$\delta_2 = \text{tg} \frac{z_1}{y_1} \quad (4)$$

则太阳光的入射角与反射角为：

$$\theta_3 = \theta_4 = 90^\circ - (\alpha_2 + \delta_2) = 90^\circ - (\alpha - \alpha_2) \quad (5)$$

由(5)式，计算可得平面镜面与z轴正向之间的夹角 α_2 为：

$$\alpha_2 = \frac{\alpha - \delta_2}{2} = \frac{1}{2} \left(\alpha - \text{tg} \frac{z_1}{y_1} \right) \quad (6)$$

结论2. 若太阳能电池阵列的中心位置为(0, y_1 , z_1)，某块平面镜的中心位置为(x_1 , y_1 , 0)，当太阳的方向角为 γ_s ，高度角为 α ，平面镜面与x轴正向之间的夹角 α_1 为 $\frac{1}{2} \left(\gamma_s - \text{tg} \frac{y_1}{x_1} \right)$ ，

与z轴正向之间的夹角 α_2 为 $\frac{1}{2} \left(\alpha - \text{tg} \frac{z_1}{y_1} \right)$ 。

4. 最佳发电量控制策略分析

4.1 太阳能电池接收最佳光强的分析

常规太阳能电池的输出峰值功率与光强的关系如图4所示。从图4可得，太阳能电池输出峰值功率在光强较小时，大致成正比增加，当光强达到一定程度时，输出功率增加的很缓慢。常规太阳能电池接受的光强达到一定值后（一般可以在几倍到二十倍之间的光强下工作，能得到很好的效果^[3]），再增加光强收效很小，反而会增加系统的投资。因此，存在一个在投资和收效进行权衡后的最佳光强。这个最佳光强记为 E_m 。

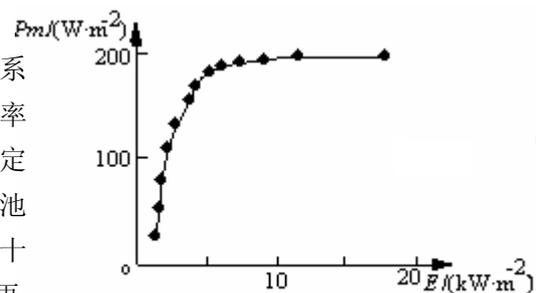


图4 常规太阳能电池峰值输出功率与光强的关系

Fig.4 Pm-E curve of solar cell

根据相关文献资料可知，常规太阳能电池采用不冷却聚光，入射光强为额定光强的4~5倍时仍有较高效率；采用聚光并进行冷却后，常规太阳能电池在光强为额定光强的6倍时仍有较高效率。

结论3. 根据简单经济实用原则，在常温无冷却条件下，常规太阳能电池可取额定光强的5~6倍为最佳光强 E_m 。

4.2 最佳发电量控制策略

由图4可得，太阳能电池阵列接收光强为额定光强的5倍以下时，太阳能电池阵列的最大输出功率与接收光强基本成正比关系。当太阳能电池阵列的额定功率为 P_1 (kW)，太阳能电池阵列经多个平面镜反射聚光，可接收到最佳光强 E_m ，太阳能电池阵列输出最大功率 P_m 为：

$$P_m = (5 \sim 6) \times P_1 \text{ (kW)} \quad (7)$$

在常温下每天系统运行时间为 h_1 小时，太阳能电池阵列每天输出最大发电量 W_m 为：

$$W_m = h_1 P_m \text{ (kWh)} \quad (8)$$

在聚光条件下，采用的 N_1 块平面镜反射，每个平面镜利用两轴伺服驱动进行方位角与

高度角调整。每轴伺服驱动功率为 $P_2(\text{kW})$ ，每天每轴总的调整工作时间为 h_2 小时，所以伺服驱动机构损耗 W_s 为：

$$W_s = 2N_1 P_2 h_2 (\text{kWh}) \tag{9}$$

因此系统实际每天的发电量 W_Z 为：

$$W_Z = W_m - W_s = h_1 P_m - 2N_1 h_2 P_2 (\text{kWh}) \tag{10}$$

太阳能电池的光伏特性如图 5a 所示^[6]，功率随着太阳能电池阵列光强的变化而发生变化。由 E_m 对应的 $P-V$ 特性曲线，进行最大功率点自寻优跟踪控制（MPPT），如图 5b^[7] 所示。以实现太阳能电池阵列在最佳光强 E_m 下最大功率输出。

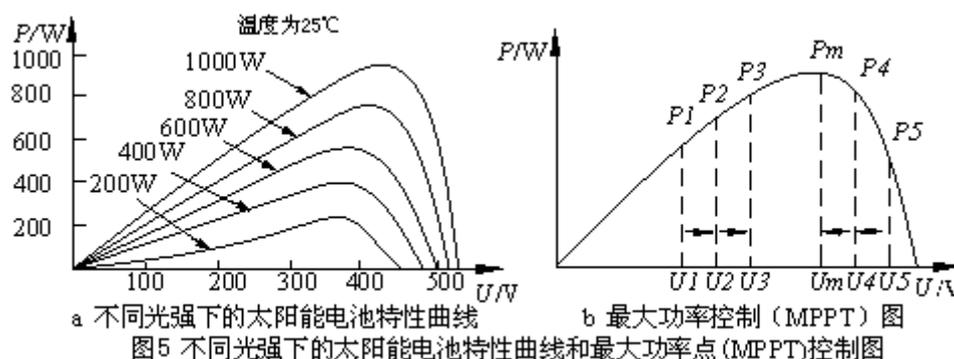


Fig.5 Characteristics of voltage power of PV battery in different light density and control course of MPPT

结论 4。 根据(20)式可知，多镜面聚光型光伏发电系统的发电量不仅与太阳能电池阵列的最佳光强 E_m 下输出功率有关，而且与多镜面伺服驱动机构的损耗有关。所以最佳发电量控制策略要求为：

- 1) 太阳能电池阵列接受最佳光强 E_m 所需要的平面镜数量 N_1 最少，并进行最大功率点跟踪(MPPT)。
- 2) 多镜面伺服机构的每轴驱动功率 P_2 要小。
- 3) 每轴调整工作时间尽可能的少。

5. 实验仿真

实验条件为：选用 Bn-40D 型太阳能电池组件，额定功率为 40W，60cm×40cm，在不冷却条件下，连续工作 1 小时，TRM-PD 型人工太阳模拟发射器装置（由氙灯及控制系统等组成），光源为近似太阳光的长弧氙灯（3kW）；采用轻质不锈钢反光板 9 块，60cm×40cm，伺服驱动步进电机 18 台（0.012kW/台），2 分钟动作一次，每次调整时间为 8 秒，1 小时中伺服驱动步进电机工作了 4 分钟。

系统如图 2 布置。取额定光强的 5 倍为最佳光强 E_m 。实时检测太阳能电池组件表面光强与 E_m 比较，调整反光板的角度，直到电池接收到最佳光强 E_m ，再进行 MPPT 跟踪，实现最大发电量。

经多次不同光强实验测试，在不聚光条件下，太阳能电池接收额定光强 1.0kW/m^2 ，测得太阳能电池的发电量为 0.0396 kWh ；在额定光强的 5 倍聚光条件下，太阳能电池接收光强为 5kW/m^2 ，太阳能电池输出电量为 0.1983kWh ，伺服驱动机构消耗 0.0144 kW/m^2 ，实际发电量为 0.1839 kWh 。本项目采用了 Visual Basic6.0 软件编程。实验结果显示，聚光条件下光伏系统的发电量接近不聚光时的 5 倍。

6. 小结

本文采用多镜面作直线布置构成聚光器,聚光均匀,加工工艺相对简单,储存、运输、安装及维修更换都极为方便。并给出了单镜面的面积 $L \times W$ 和最佳光强 E_m 下的镜面数量计算方法,进行最佳发电量控制,充分利用太阳能电池,可以降低光伏系统的太阳能电池配置功率,从而可以降低系统成本,收效显著。

本文实验在常温无冷却条件下进行,太阳能电池温度升高对使用寿命影响未作考虑。

参考文献

- [1] Mary D A, Robert H. Clean electricity from photovoltaics[M], London: Imperial College Press, 2001.
- [2] 吴玉庭, 朱宏晔, 任建勋等. 聚光与冷却条件下常规太阳电池的特性[J]. 清华大学学报, 2003, 43: 1052-1055.
- [3] 吴玉庭, 朱宏晔, 任建勋等. 聚光条件下太阳电池的热电特性分析[J]. 太阳能学报, 2004, 25: 337-340.
- [4] 宁铎. 折面形抛物柱太阳能聚光器的研制[J]. 太阳能学报, 2003, 24: 616-619.
- [5] 倪萌, M K Leung, K Sumathy. 太阳能电池研究的新进展[J]. 可再生能源, 2004, 总第 114 期: 9-11.
- [6] 欧阳名三, 余世杰, 沈玉梁等. 具有最大功率点跟踪功能的户用光伏充电系统的研究[J]. 农业工程报, 2003, 19: 272-275.
- [7] 杨海柱, 金新民. 最大功率点跟踪的光伏并网逆变器研究[J]. 北京交通大学学报, 2004, 28: 65-68.

Study of The Design Method of Solar Energy Photovoltaic System In Linear Multi-glass Focusing Solar Radiation

Yang Jinfu

School of Electric Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei,
PRC (230009)

Abstract

In this paper, the design theory of linear concentrator composed with glasses is discussed. The calculation methods of the area of each glass and of the planar angles of glasses that aggregate radiation on the surface of PV battery are introduced. The optimum total power control strategy is analyzed when the surface of PV battery in optimum light density. In this experiment, the paraboloid concentrator composed with nine glasses causing the surface of PV battery in five times rating light density is adopted. The output power of standard configuration PV battery can be increased greatly.

Keywords: multi-glass; concentrator; photovoltaic; optimum total power