

北京航空航天大学

第 23 届“冯如杯”学术
创意大赛参赛论文

科技发明制作类

光伏光热一体化设计

北京航空航天大学

二〇一三年四月 制

摘要

本篇综述主要是对现在的太阳能光伏光热（PV/T）一体化技术的背景和发展进行了概述，对其基本结构进行了说明和其基本原理进行简单概括。本项目采用跟踪聚光的光伏发电技术，在同样的发电功率等级条件下，减少若干倍的电池片面积，从而降低光伏发电的成本。本项目设计了一种聚光型光伏光热一体机热交换系统，通过对热交换系统的试验研究表明，该热交换系统有效解决了聚光光伏电池片的散热问题，而且可获得较热的热水。

关键字 光伏光热 效率 太阳能

Abstract

This review mainly covers the background and development of solar energy PV/T system, and shows the description of its structure and basic theory. Depend on the type of heat transfer, it classified as air-typed, water-typed and heat-pipe, heat pump and covers the latest condition. This project use the tracking concentrating PV/T system technology. Under the condition of the same power level ,we reduce the cell' s area several-fold to decline the cost of the photovoltaic power generation. We produce an auto tracking concentrating PV/T system. According to the experimental study, the system solve the problem of solar panel' s heat dissipation. And we can also get hot water from our project.

Keyword: PV/T Efficiency solar energy

目录

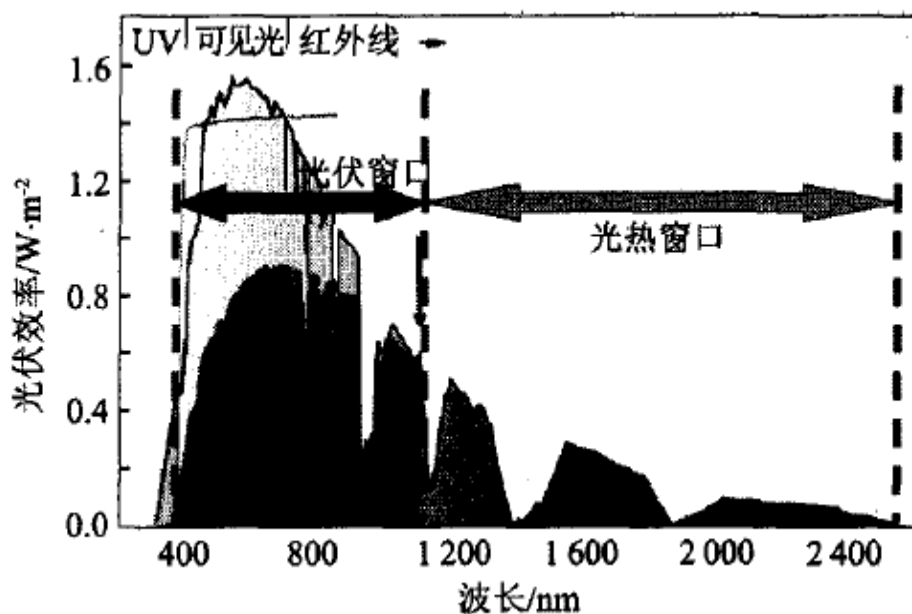
一 选题依据	1
二 背景介绍	3
2.1 能源使用的大背景.....	3
2.2 光伏光热一体化的提出.....	3
2.3 光伏光热一体化总体概括.....	5
三 项目信息	7
3.1 项目介绍.....	7
3.2 项目特色和创新.....	7
3.3 关键技术难点解析及解决方法.....	7
四 项目理论基础	8
4.1 光伏光热一体化集热板.....	8
4.1.1 光伏光热集热板结构.....	8
4.1.2 光伏光热集热板的理论方程.....	9
4.2 光伏光热一体化平面镜设计计算.....	12
4.2.1 柱形抛物面集热器	12
4.2.2 聚光度 c : 几何聚光度, 聚焦型集热器的重要设计参数之一.....	13
4.2.3 聚焦型集热器效率	17
4.2.4 接收器热损失	18
4.2.5 集热器实际获得的能量	18
4.2.6 集热器的效率	18
4.2.7 太阳能集热器最佳运行条件	18
4.2.8 低聚光比系统最佳运行温度	18

4.2.9 典型情况	19
4.2.10 最佳运行温度	20
4.2.11 高聚光比系统的最佳运行温度	20
4.2.12 高聚光比系统总效率随集热器温度的变化曲线	21
4.3 光伏光热一体化总体图.....	22
五 发展趋势	23
六 参考文献	25

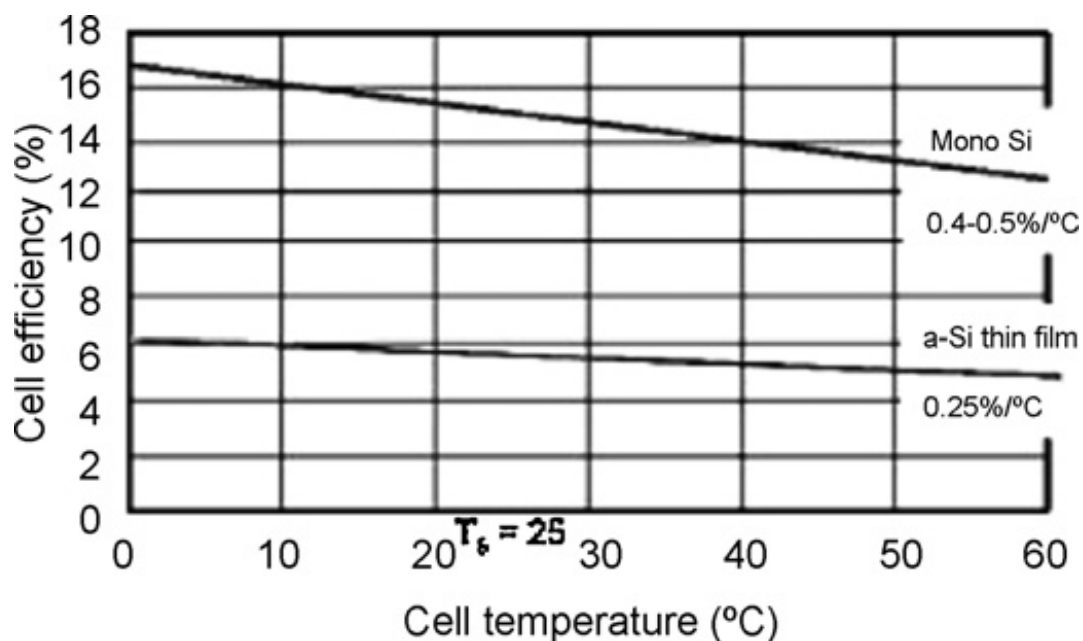
一 选题依据

风能、生物质能和太阳能等可再生能源的开发利用是节约化石能源和解决环境污染的重要途径。目前太阳能低温热水系统和太阳能光伏发电系统的应用都得到了快速发展。在一些地区，家用太阳能热水系统的经济性和能源节约效果已经显现。独立和并网光伏发电系统在技术上已经比较成熟，但由于系统发电成本较高，因此大规模应用需要依赖国家政策，但最终还要通过大幅度降低光伏系统的发电成本来实现。

但是总体来说单一的利用效率总是有限的，并且因为太阳能利用中，光伏的只能利用太阳光短波辐射的能量，而光热主要利用是太阳能光长波辐射的能量，总体来说光电转换效率一般只有15%左右，并且因为光伏转换效率与太阳能面板的温度有这直接的关系并且随着温度的升高下降0.45%左右如图一所示。在实际利用的过程中因为随着自然对流所能带走的热量是有限的所以大部分的多余能量都被集热板吸收了造成了集热板温度的上升，造成了电池转换效率的下降，尤其是在夏季高温，电池板温度达到80°左右高温的情况下，电池效率会下降很多，如图二所示。



图一



图二

同时在我国太阳能集热器取得非常迅速的发展，光热的利用主要是利用热量与整个光伏组件做匹配的话刚好有这互补的效果，所以近些年光伏光热一体化的概念被大量的学者进行了研究。而热泵技术可以将低品位的能量转换成高品位的热量的特点，使其与太阳能结合运用称为一个很有前途的方向。太阳能热泵从系统上分为直膨式和间接式。在于光电系统集合的过程，直膨式系统可以直接利用所集热板做为其蒸发端所以以这里提出一个设计一个聚光型的光伏热泵一体化的设计。并且将集热板做为热泵的蒸发段使得结构更加紧凑，同时聚光系统的采用可以大大减少制作的成本。

二 背景介绍

2.1 能源使用的大背景

随着油价的越来越高和化石燃料的消耗造成的环境的巨大的压力对于洁净燃料的需求有了很大的刺激作用。尤其是在亚洲国家还在工业化的建设时期，化石燃料的消耗还在一个很高的程度，而大量的碳排放加剧了温室效应。而现在可持续的能源只占世界总的能源消耗的13.3%，所以说新能源技术的发展有这巨大的空间。而11年日本的核泄漏事件使的大家更加青睐那些更加安全的能源技术，与此同时太阳能在整个一次能源供应方面仅仅只占到了世界能源的0.5%左右，其中光热占到了0.5%而光电技术则只有0.04%。而每年大地接受的太阳能达到了380万EJ, 相应的持续的技术进步和公众环保意识使其巨大的空间可以发展。现在来说光热技术是最有效的太阳能利用技术之一，在全球有这巨大的市场潜力；而光电技术来说虽然现在只占到世界发电量的0.1%，但是最近几年都以每年40%的速度在进行这飞速的增长并且预测其会在2030年达到电量生产的5%到2050年可以达到11%，至关重要的是因为其生产过程中并不产生任何碳排放，所以更使其有广阔的前景。而一体化的光伏光热集合系统（俗称PV/T）因为它在利用太阳能转换电能的同时对于其热能也进行了利用使其在理论上变得非常有吸引力。

太阳是大多数可持续能源的最终来源。直接运用太阳辐射对于工程和建筑相关有很大的吸引力。太阳集热板用来把太阳辐射能转换成热能，在集热板结构中液体或者气体被加热压缩环绕于这一个环路，被用于民用或者工业预热。而光伏面板用于直接把太阳能转换成电能。虽然这几种方法可以收集太阳能但是在光伏系统中大量的被吸收的太阳能并没有转换成电能，只是太阳辐射中一小部分能量转换成了电能，大部分都变成了光伏组件的废热，从而引起光伏组件的温度升高导致组件的转换效率下降。自然冷却或者强制循环换热可以有效的降低光伏组件的温度。对光伏组件的冷却保持光伏组件在一个比较好的状态从而提高了系统的总体效率，因而光伏光热一体化集热装置提供了一个更好的使用太阳能的方法。

2.2 光伏光热一体化的提出

一般认为PV/T集热器的概念是由Kem和Russell于1978年提出的, 对于太阳能总体利

用效率有了一个巨大的提高。直到近十年来PV/T集热器的研究才越来越受到关注，主要是因为太阳能电池效率和太阳集热器效率的提高使PV/T集热器的效率得到提高，而且采用新的设计也使PV/T集热器性能得到了改善。PV/T集热器利用层压或胶粘技术将太阳能电池或组件与太阳集热器有机结合在一起，当太阳能电池发电时，由于入射太阳能转换为电能的比例约为15%，其余大部分能量都转换为热量，这些热量可通过水或空气回收，产生热水或热空气。PV/T集热器产生的热量温度一般在40~60℃，适合用于家庭热水、采暖和其它对低温热量有大量需求的公用、民用或工业领域(如工业干燥和纺织部门)。到目前为止，商业应用的PV/T集热器只有PV/T空气集热器，虽然PV/T热水集热器具有更大的需求，但此类系统还没有开始商业化。

PV/T系统最重要的部分是PV/T集热板结构，它是将一个光伏面板和太阳能集热板成为一个整体，这个结构能让太阳辐射能转换成电能的同时也转换成热能。PV/T结构的单位面积能源利用效率超过任一个单独的光伏面板或者集热面板。PV/T系统特别适合于对光热都有需求并且可用面积有限的环境。荷兰能源研究中心做的调研表明在产生相同的能量的同时其可以减少40%的集热板面积。

20世纪70年代末80年代初，美国开展了一系列PVT集热器的研究工作。这时期，通过对PVT集热器的设计、检测和制造，不仅使PVT集热器得到了发展，而且也带动了太阳能电池的进步。其研究成果也为当前PVT集热器的研究打下了坚实基础。这其中Hendrie建立了一个理论模型对于平板PV/T集热器，他做出了结论在光伏组件不运行的情况下液体和空气为基础的PV/T分别达到热效率42.5%和40%。而光伏组件运行的情况下热效率分别为40.4%和32.9%，而电效率的峰值为6.8%。而早期的工作中Florschuetz对著名的太阳能集热器的Hotell-Whillier热模型仅仅修改了电脑的原始参数，并且假设光电效率和温度成线性关系，得出了系统的热效率和电效率这些结果被用来进一步的分析各个参数和效率之间的关系。

在三十年的时间进行了很多的实验和数值的工作，在七十年代开始的时候，主要几种与对PV/T集热板的研究，主要集中于提高整体的能量效率，生活装置的设计被认为是一个最主要的利用形式，起初主要针对是加玻璃盖板的设计，后来不加盖板的和热泵一体化的设计也开始兴起起来。

2.3 光伏光热一体化总体概括

光伏光热结构可以大量运用于不同的目的，如运用于发电结构的话它既可以放置于房顶，或者大片的空地之中与电网相连。整个系统不仅非常有效率而且还是非常的环保，安全似乎理论上也是一个非常不错的选择相较于现在普遍存在太阳能发电系统来说。电网相连的 PV/T 结构来说提供给消费者经济和环境的双重利益。在使用电网相连的光伏面板提供电能的同时，还可以利用从中获得的热能满足室内建筑所需的能量负荷。

光伏一体化结构可以在那些没有电网覆盖的地方使用，并且往往缺乏必要的设备。没有可以移动的设备，所以总体来说系统的寿命是非常长的。所以对于偏远地方的电能供应是非常不错的。同时为了系统提高了太阳能的产出和电能的输出功率，一些研究者使用聚光型和跟踪型的 PV/T 系统，对于小型化和大型化的机构都有很好的效果。采用聚光设备的根源在于使用聚光器可以在使用较少的太阳能电池板在光伏系统中。一个聚光器往往采用一些比较便宜的材料比如玻璃和金属材料去使一个在相当大的区域中获得的太阳能转移到比较小的太阳能电池板的区域里面。

大量的研究侧重于提高 PV/T 的整体效率上面。不同的技术方法被使用来分析其对光伏转换效率的提高上面。总的来说，现在的商业使用的光伏面板可以转换落在其表面的能量的 6%~18%转换成电能，其余的因为发射和热损失的形式消耗掉了。然而那些被太阳能电池板吸收的能量因为其提高了太阳能电池板的温度造成了太阳能电池板转换效率的下降。短路电流不是那么强烈的温度相关，但是随着光照强度的增加会增加。这些可以得出一个结论，光伏面板的之中半导体材料的使用造成了电压的下降。

为了减少温度对于太阳能电池板性能的影响，大量的 PV/T 换热通道的结构优化被研究应用。

总的来说光伏光热一体化系统的优点可以概括为如下几点：

- 双用途性：一个系统可以同时提供电能和热能输出
- 效率和方便性：联合的效率总是高于其中任何一个单独的系统特别是房顶空间有限的情况下。
- 广泛的应用性：热能的输出既可以运用于加热也可应用于制冷设备根据季节的不同灵活的选择。
- 便宜和可行性：可以在房屋结构不做大的改变情况下与房屋一体化设计，

从而替代房屋材料，减少成本的回收时间。

三 项目信息

3.1 项目介绍

本项目采用跟踪聚光的光伏发电技术,在同样的发电功率等级条件下,减少若干倍的电池片面积,从而降低光伏发电的成本。本项目设计了一种聚光型光伏光热一体机热交换系统,通过对热交换系统的试验研究表明,该热交换系统有效解决了聚光光伏电池片的散热问题,而且可获得较热的水。

3.2 项目特色和创新

1. 对于太阳能全光谱综合利用
2. 在对于光伏利用的阶段,其和太阳能电池板的温度密切相关,随着温度的增加太阳能光伏转换效率会下降。热交换器使得这一问题得到了有效的解决并且将热量进行了有效的利用
3. 智能跟踪系统保证了太阳能的最大利用
4. 节能减排

3.3 关键技术难点解析及解决方法

1. 太阳能的不稳定输入——连接蓄电池,利用蓄电池来输出电能
2. 蓄电池电量回流到太阳能电池板——焊接一个单向二极管
3. 太阳能电池板的效率随着温度升高而降低——连接热交换器导出热量
4. 太阳的周期性引起太阳直射方向改变——智能跟踪系统
5. 跟踪系统易受外界灯光的影响而偏移——根据当地具体情况调整系统以

四 项目理论基础

4.1 光伏光热一体化集热板

4.1.1 光伏光热集热板结构

PV/T集热器的主要部件为太阳电池和集热板，为了降低集热器的热损失，通常在电池上方安装一层或二层玻璃盖板，在背部和边缘包上一定厚度的保温层，所有部件最后用金属框架封装为一体。目前，见于报道的PVT集热器有平板型和聚光型。平板型PVT集热器由于结构简单、可在普通集热器的基础上加工改造，而且易于与建筑物结合，因此其研究较聚光型PV/T集热器广泛。根据集热器的冷却流体不同，PVT集热器又可分为PV/T液体集热器(以水为冷却流体)和PVT空气集热器(以空气为冷却流体)。另外，按有无盖板还可分为有盖板PVT集热器和无盖板PVT集热器。图1为典型的PVT液体集热器结构示意图，其结构由扁盒式集热器与太阳电池结合而成，图1a为无盖板PVT液体集热器，图1b为有盖板PVT液体集热器。PVT空气集热器的冷却流道一般为矩形截面流道结构，由于空气密度低，热容比水小，为了降低电池温度，需要较大的空气质量流率，所以PVT空气集热器冷却流道的截面积要比液体集热器的大。PVT液体集热器的传热性能通常比空气集热器好，因此，PVT液体集热器的效率高于PvT空气集热器。盖板对集热器的影响表现为：无盖板的PVT集热器具有较高的电池效率，但流体出口温度不高；而有盖板的PVT液体集热器具有较高的热效率和流体出口温度，但盖板会降低入射光的透过率，使电池效率下降。太阳电池町选用单晶硅、多晶硅、非晶硅或其它薄膜材料，一般选用效率较高的单晶硅和多晶硅材料电池。

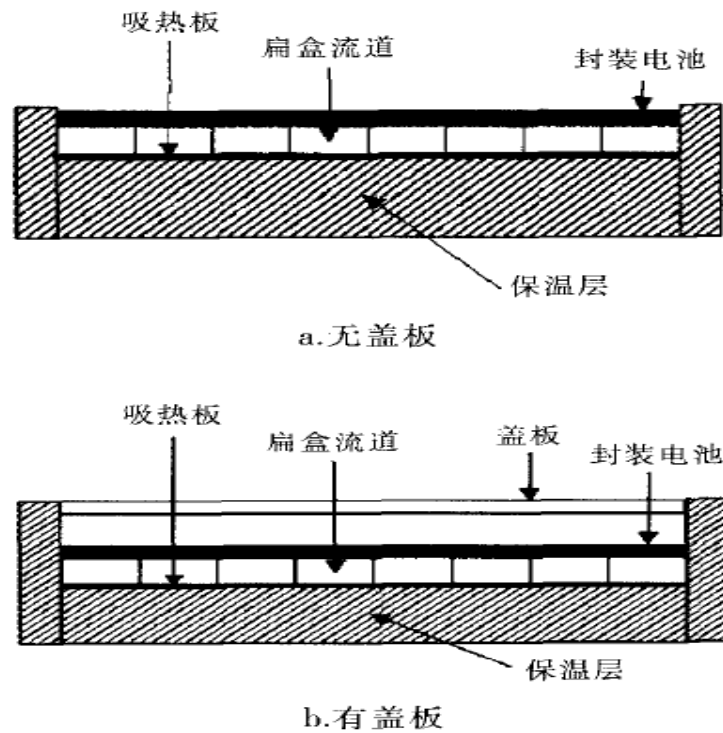
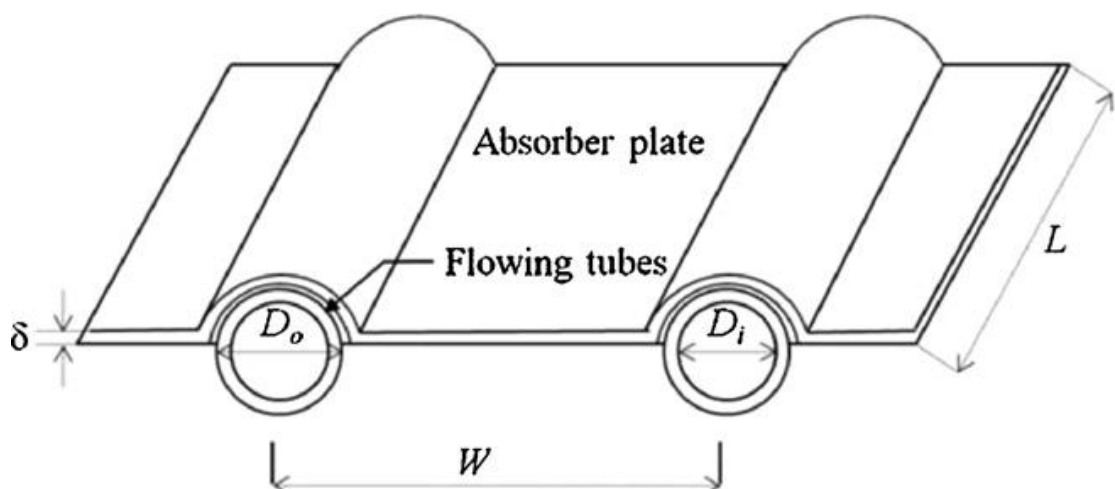


图 1 PVT 液体集热器

像太阳能集热板一样, PV/T 一体化根据集热方式的不同也分为气体冷却和液体冷却方式。因为液体传热效果和比热容的优势使其效率明显大于气体模式。但是使用液体换热的形式不可避免的要增加辅助结构, 因此从简单的层面气体形式是最简单的。

4.1.2 光伏光热集热板的理论方程

一个典型的 pv/t 平板式结构如图所示:



针对平板式 PVT 的热效率采用有效热能 QU 和总的辐射的热量的比值 E , 可以表示为:

$$\eta_{th} = \frac{Q_U}{E}$$

根据 Hottel-Whiller-Bliss 公式平板式集热器的有效热输出可以表达为:

$$Q_U = FA_c[E(\tau\alpha) - U_l(T_p - T_a)]$$

其中 F 是肋效率, 可以用一下公式去估计:

$$F = \frac{\tanh \left[\sqrt{\left(\frac{U_l}{k\delta}\right)}(W - D)/2 \right]}{\sqrt{\left(\frac{U_l}{k\delta}\right)}(W - D)/2}$$

由于吸热板的温度 T_p 在整个平板的范围内是变化这的, 所以吸热板的温度获得可以以平均流体温度做估量, 这是容易控制和测量的。因而基于流体平均温度的热输出为:

$$Q_U = F'A_c[E(\tau\alpha) - U_l(T_p - T_a)]$$

在这里效率因子对于不同的热流体(气体或者液体)有不同的表达形式, 对于水来说:

$$F' = \frac{\frac{1}{U_l}}{S \left[\frac{1}{U_l[(W - D)F + D]} + \left(\frac{1}{c_b}\right) + \left(\frac{1}{h\pi d_i}\right) \right]}$$

对于空气来说

$$F' = \frac{1}{1 + \left[\frac{U_l}{\frac{hA}{A_c}} + \frac{1}{h_f + h_r} \right]}$$

用流体的进口温度来表达集热器的热收益会更加便利。表达式可以表示为:

$$Q_U = F_RA_c[E(\tau\alpha) - U_l(T_i - T_a)]$$

$$\frac{F_R}{F'} = \frac{GC_p}{U_l F'} \left[1 - \exp \left(-\frac{U_l F'}{GC_p} \right) \right]$$

因此在准稳态的情况下平板热效率可以被表示为

$$\eta_{th} = \frac{Q_U}{E}$$

而电能的表达形式为：

$$\eta_e = \frac{P_0}{IA_c}$$

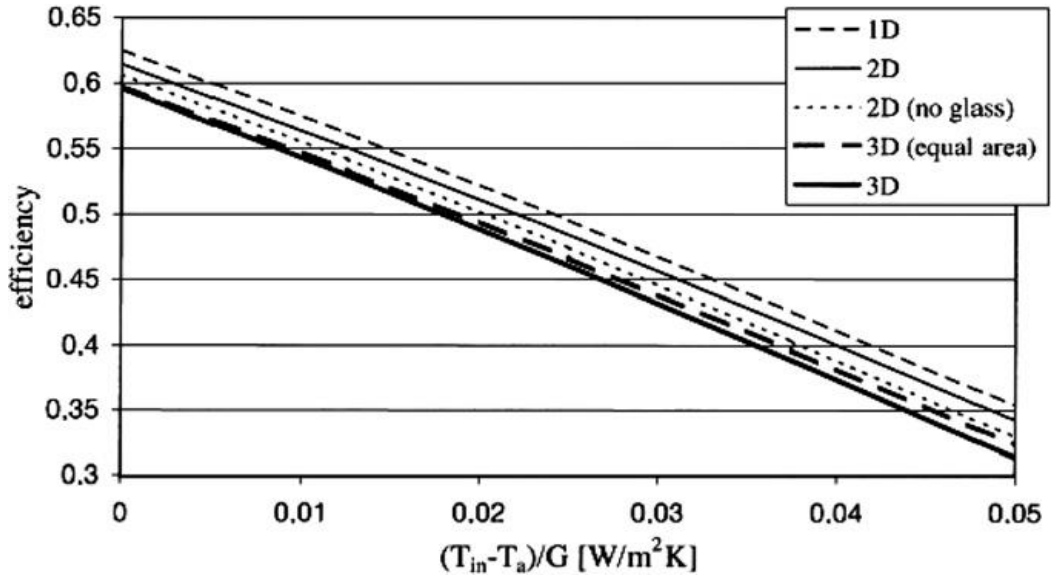
并且我们知道电能的效率随这光伏原件温度的升高而降低可以表达为：

$$\eta_e = \eta_{rc}[1 - \beta_{pv}(t_p - t_{rc})]$$

总的电能产出可以表达为

$$Q_e = P_0 = \eta_e IA_c$$

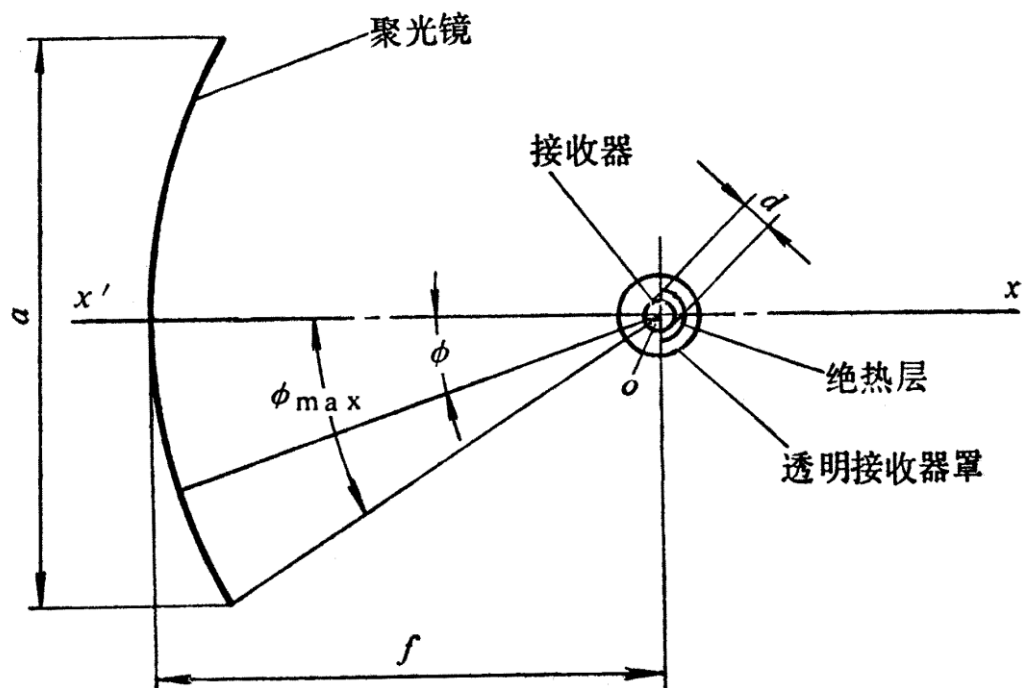
Zondag 设计并且运用了一维二维和三维模型，结果发现其一维模型和三维模型基本上和三维模型在结果上差别很小，完全可以使用一维的模型去计算整个系统的性能，如图所示：



其最后成为后来数值计算的理论基础，后期的数值理论计算基本都采用了一维的模型去进行计算求解。

4.2 光伏光热一体化平面镜设计计算

4.2.1 柱形抛物面集热器



a : 反射镜的口径;

f : 反射镜的焦距;

ϕ : 在横切面内, 从接收器看反射镜上一点对主光轴的偏角;

ϕ_{\max} : 反射镜的边缘角;

$n = \frac{a}{f}$: 反射镜的相对口径;

d : 接收器的直径;

L : 集热器的长度。

α : 截光角, 也称太阳张角,

投射到聚光镜上的能量: Q_c

到达接收器的能量： Q_r

略去损失，则 $Q_c = Q_r$

聚光镜投影面积： $A_c = aL$

接收器表面积： $A_r = \pi dL$

投射到反射镜上能量密度： $\frac{Q_c}{A_c}$

投射到接收器上能量密度： $\frac{Q_r}{A_r}$

4.2.2 聚光度 c：几何聚光度，聚焦型集热器的重要设计参数之一

$$c = \frac{Q_r / A_r}{Q_c / A_c} = \frac{A_c}{A_r} = \frac{a}{\pi d}$$

对于吸收面为平面的柱形抛物面集热器，假定入射光线平行于主光轴，则最大几何聚光度为：

$$c = \frac{A_c}{A_r} = \frac{aL}{dL} = \frac{nf}{2f \cdot \tan \frac{\alpha}{2}} = \frac{n}{2 \cdot \tan \frac{\alpha}{2}} = 107.3n$$

接收器的绝热平衡温度 T

- 绝热平衡：无对流热损失、无热利用，接收器接收的投入辐射的热量等于自身发射辐射放出的热量

$$A_c I \rho \alpha_r = A_r \varepsilon_r \sigma T^4$$

$I \rightarrow$ 投入辐射通量， W/m^2

$A_c \rightarrow$ 反射镜投影面积， m^2 ；

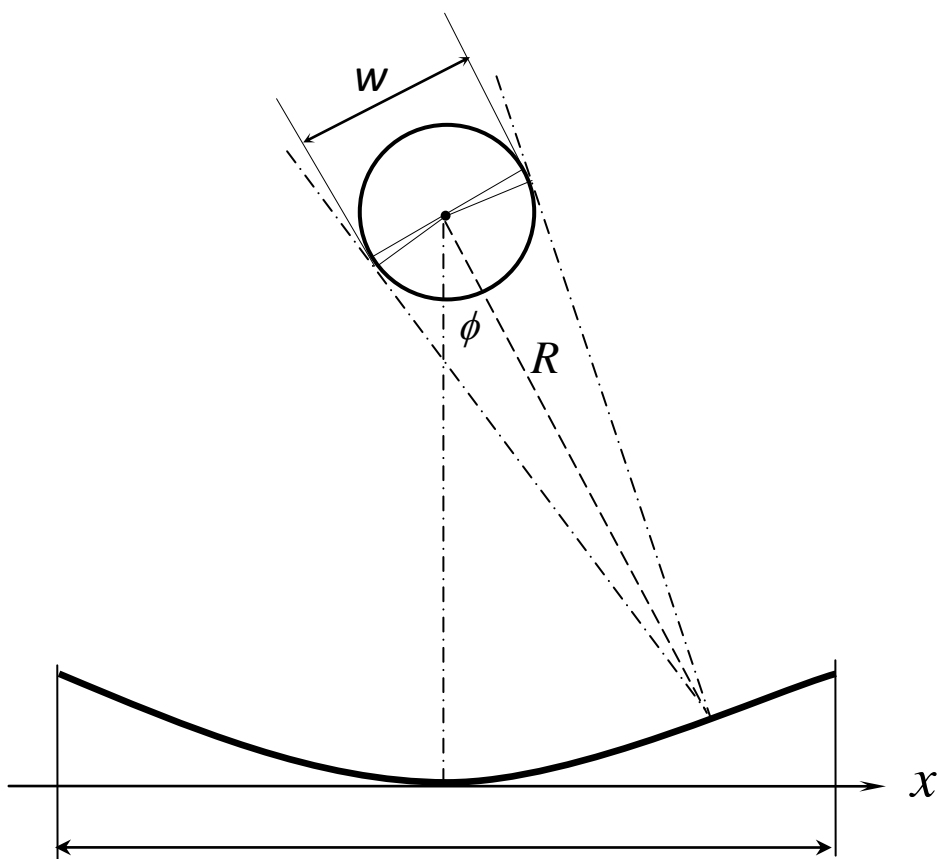
$\rho \rightarrow$ 反射镜的反射率；

$\alpha_r \rightarrow$ 接收器表面的吸收率；

$A_r \rightarrow$ 接收器的面积， m^2 ；

$\varepsilon_r \rightarrow$ 接收器表面的发射率；

$$\begin{aligned} T^4 &= \left(\frac{A_c}{A_r} \right) \left(\frac{\alpha_r}{\varepsilon_r} \right) \left(\frac{I\rho}{\sigma} \right) \\ &= c \left(\frac{\alpha_r}{\varepsilon_r} \right) \left(\frac{I\rho}{\sigma} \right) \end{aligned}$$



焦点上太阳焦像的宽度为：

$$w = 2Rtg \frac{\alpha}{2}$$

抛物线的方程为: $x^2 = 4fy$

可以写成 $x = R \sin \phi$

$$y = f - R \cos \phi$$

则 $x^2 = R^2 \sin^2 \phi = R^2(1 - \cos^2 \phi)$

$$\Rightarrow R = \frac{2f}{1 + \cos \phi}$$

$$\text{焦像宽度: } w = 2Rtg \frac{\alpha}{2} = \frac{4ftg \frac{\alpha}{2}}{1 + \cos \phi}$$

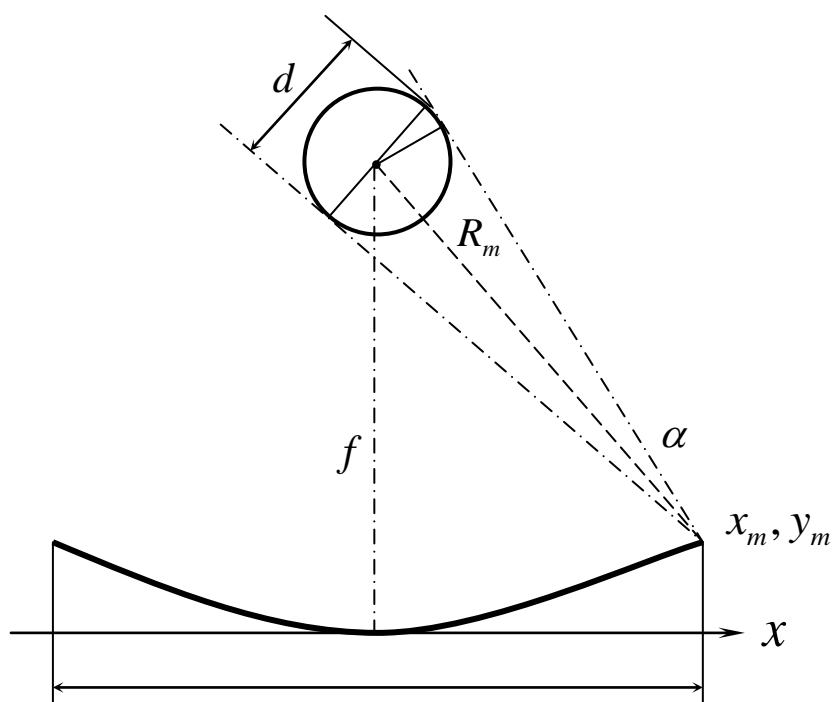
$$\text{焦像宽度在边缘角处取得最大值: } w_{\max} = \frac{4ftg \frac{\alpha}{2}}{1 + \cos \phi_{\max}}$$

柱型抛物面反光镜-圆管接收器系统聚光比 c

$$\text{几何聚光比 } c = \frac{a}{\pi d}$$

$$\text{接收器最小直径 } d_{\min} \geq 2R_m \sin \frac{\alpha}{2}$$

$$\text{其中 } R_m = \frac{2f}{1 + \cos \phi_{\max}}$$



根据抛物线方程进行分析可得 $R_m = f + \frac{a^2}{16f}$

则接收器最小半径 $d = 2R_m \sin \frac{\alpha}{2} = 2\left(f + \frac{a^2}{16f}\right) \sin \frac{\alpha}{2}$

聚

光

比

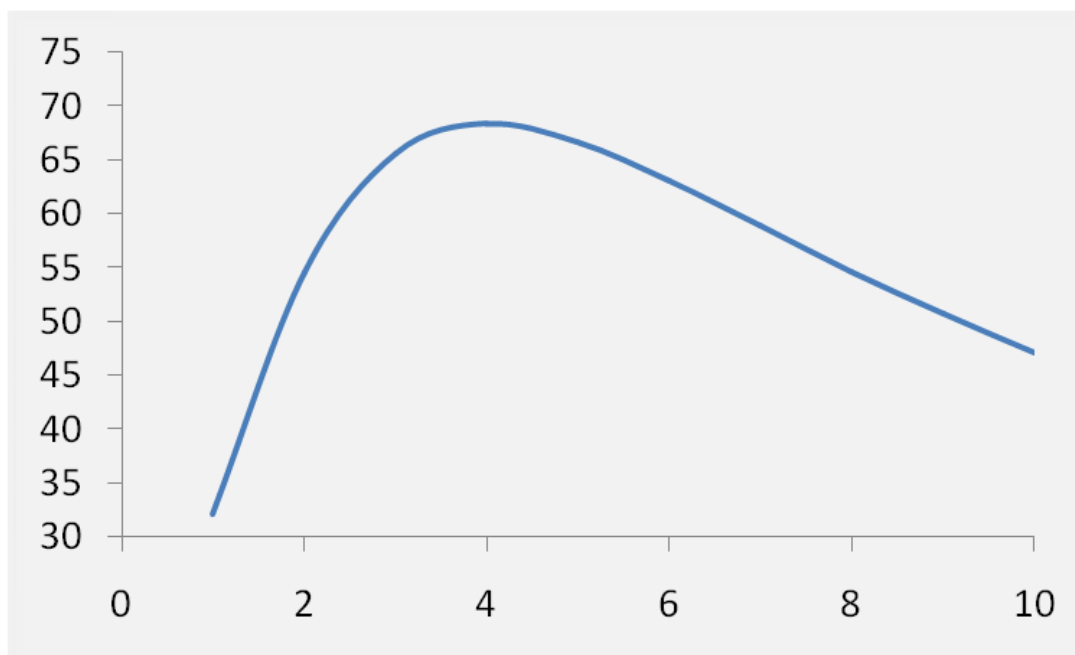
$$c = \frac{a}{\pi d} = \frac{a}{2\pi\left(f + \frac{a^2}{16f}\right) \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{(a/f)}{2\pi\left(1 + \frac{(a/f)^2}{16}\right) \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{n}{2\pi\left(1 + \frac{n^2}{16}\right) \sin \frac{\alpha}{2}}$$

代入 $\alpha = 32'$

$$c = \frac{107.3n}{\pi\left(1 + \frac{n^2}{16}\right)}$$

在极值点，c 对 n 一阶偏导数为 0:

$$\frac{dc}{dn} = \frac{107.3}{\pi} \left(\frac{1 + \frac{n^2}{16} - n \frac{2n}{16}}{\left(1 + \frac{n^2}{16}\right)^2} \right) = 0$$



$$\Rightarrow n = 4 \quad c_{\max} \approx 68.4$$

旋转抛物面反射镜-圆板接收器系统聚光比

接收器圆板的直径应为 $d_{\min} = 2f \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$

$$c = \frac{a^2}{d^2} = \frac{(nf)^2}{(2f \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2})^2} = \frac{(n)^2}{(2 \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2})^2}$$

聚光比

$$\text{取 } \alpha = 32' \text{ 则 } c = 11550n^2$$

旋转抛物面反射镜可以获得高聚光比,可以获得高热源温度,从而提高热动力循环热效率。

4.2.3 聚焦型集热器效率

- 集热器效率是集热器载热介质实际获得能量与投入到反射镜上太阳辐射能之比
- 柱型抛物面聚焦型集热器 :
- 单位时间内投入到反射镜能量

$$Q = A_c I = A_c I_0 \cdot P_1^m \cdot \cos i$$

单位时间内接收器接受能量

$$Q_{ab} = A_c \cdot I \cdot \rho \cdot \tau \cdot f \cdot \alpha_r \cdot F(\phi)$$

$f \rightarrow$ 截光因数

$F(\phi) \rightarrow$ 跟踪误差修正系数。

4.2.4 接收器热损失

辐射热损失: $Q_{ra} = A_r \cdot \varepsilon_r \cdot \sigma \cdot (T_r^4 - T_a^4)$

对流热损失: $Q_c = A_r \cdot h \cdot (T_r - T_a)$

4.2.5 集热器实际获得的能量

$$Q_u = A_c I \rho \tau f \alpha_r F(\phi) - A_r \varepsilon_r \sigma (T_r^4 - T_a^4) - A_r h (T_r - T_a)$$

4.2.6 集热器的效率

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{Q_u}{A_c I} = \rho \tau f \alpha_r F(\phi) - \frac{A_r \varepsilon_r \sigma}{A_c I} (T_r^4 - T_a^4) - \frac{A_r h}{A_c I} (T_r - T_a) \\ &= \rho \tau f \alpha_r F(\phi) - \frac{\varepsilon_r \sigma}{c I} (T_r^4 - T_a^4) - \frac{h}{c I} (T_r - T_a) \end{aligned}$$

4.2.7 太阳能集热器最佳运行条件

太阳能电站系统的总的效率 = 集热器效率 \times 热力循环效率

$$\eta_s = \eta_c \times \eta_e$$

η_c 随着集热器温度出口的升高而降低

η_e 随着集热器温度出口的升高而降低

4.2.8 低聚光比系统最佳运行温度

低聚光比的太阳能集热系统, 载热介质很难达到高出口温度, 因此在集热器效率分析中, 集热器辐射热损失不占主导地位, 但导热、对流形成热损失不可以忽略。

集热器效率

$$\eta_c = \frac{(\tau \alpha) A_c I \rho - U_r A_r (T_r - T_a)}{A_c I}$$

热动力循环系统按理想的卡诺循环考虑则集热器-卡诺循环系统总效率为：

$$\eta_s = \left(\frac{T_r - T_a}{T_r} \right) \left(1 - \frac{U_r (T_r - T_a)}{c \cdot I \cdot (\tau\alpha) \rho} \right) (\tau\alpha) \rho$$

4.2.9 典型情况

环境温度为 5℃ 即 278K

太阳能辐射强度

$$I = 600 \text{ W/m}^2$$

集热器热损失系数

$$U_r = 5 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)},$$

透过吸收积

$$(\tau\alpha) = 0.85$$

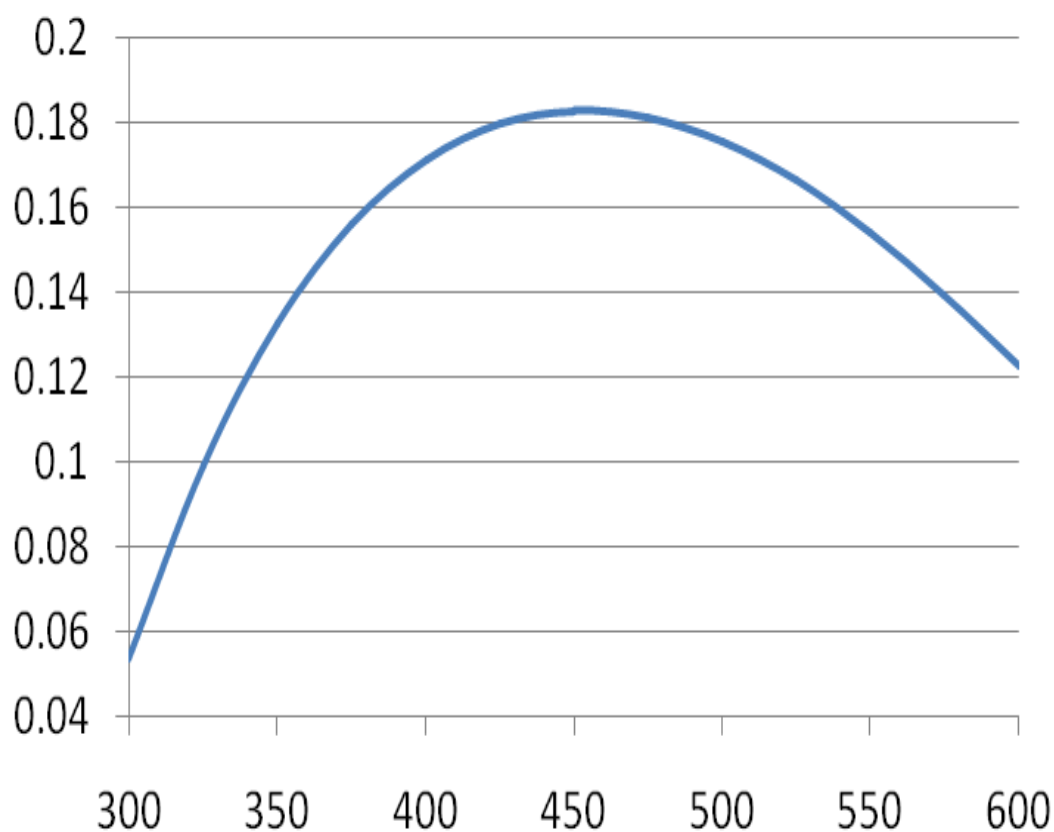
反射镜的反射率

$$\rho = 0.9$$

集热器的聚光比为

$$c = 5$$

系统总效率随集热器温度的变化曲线



4.2.10 最佳运行温度

在最大效率处，系统效率对运行温度的一阶导数为 0

$$\frac{d\eta_s}{dT_r} = 0$$

可得低聚光比系统的最佳运行温度：

$$T_r = \sqrt{T_a \left(\frac{Ic\rho(\tau\alpha)}{U_r} + T_a \right)}$$

按上述典型数据，最佳集热器温度为 452.6K，即 179.4℃。此时，太阳能电站的总循环效率为 18.3%

4.2.11 高聚光比系统的最佳运行温度

- 高聚光比系统辐射热损失占主导地位，对流热损失相对较弱，可忽略。因此，集热器效率可以表示为：

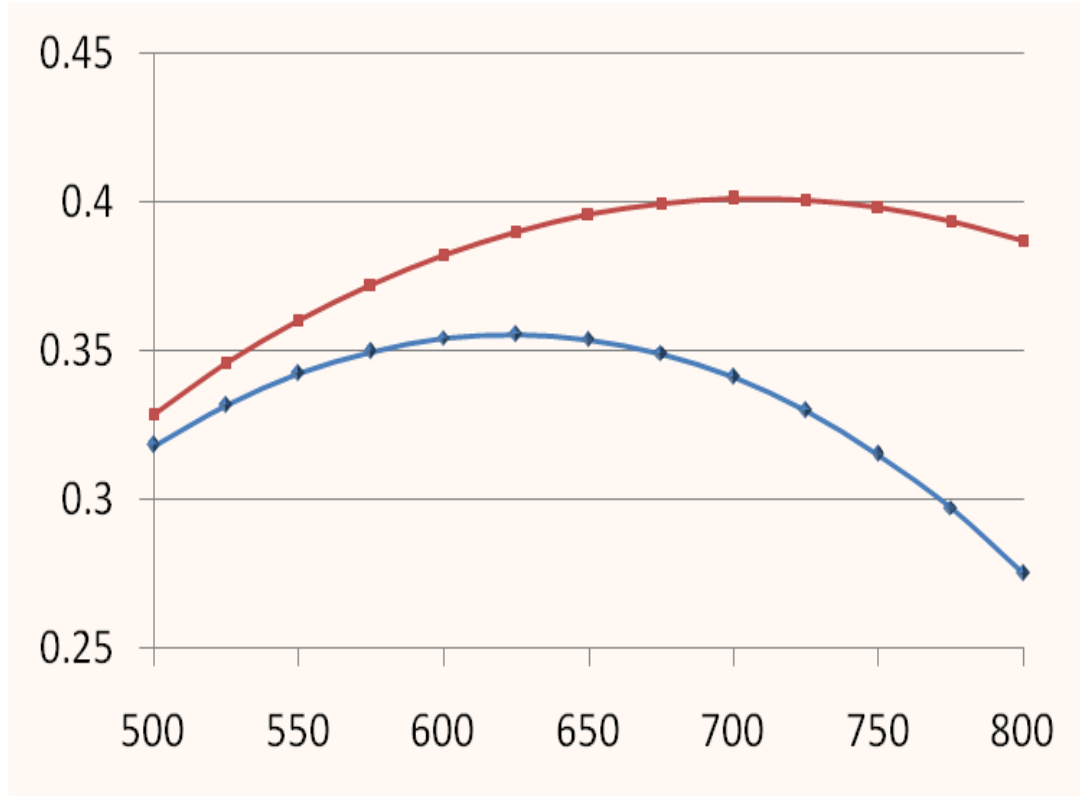
$$\eta_c = \frac{(\tau\alpha)A_c I \rho - \varepsilon_r A_r \sigma (T_r^4 - T_a^4)}{A_c I}$$

$$= (\tau\alpha)\rho - \frac{\varepsilon_r \sigma}{I_c} (T_r^4 - T_a^4)$$

集热器-卡诺循环系统的总效率为

$$\eta_s = \left(\frac{T_r - T_a}{T_r} \right) \left((\tau\alpha)\rho - \frac{\varepsilon_r \sigma}{I_c} (T_r^4 - T_a^4) \right)$$

4.2.12 高聚光比系统总效率随集热器温度的变化曲线



由 $\frac{d\eta_s}{dT_r} = 0$ 可得最佳运行温度方程：

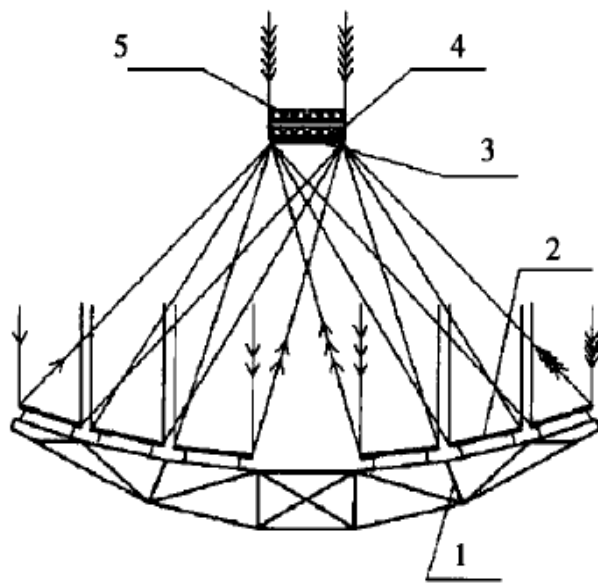
$$T_r^5 \frac{4\varepsilon_r \sigma}{I_c} - T_r^4 \frac{3T_a \varepsilon_r \sigma}{I_c} - T_a \rho \tau \alpha = 0$$

最佳温度由上式确定。求解上面的方程，可得 5 个根，其中 4 个虚根，1 个实根
按前述典型环境数据可得

$c = 100$ 时，最佳集热器温度为 623.129K；

$c = 200$ 时，最佳集热器温度为 707.499K。

4.3 光伏光热一体化总体图



1. 镜架； 2. 平面镜； 3. 电池片； 4. 热交换器； 5. 集热板

五 发展趋势

PV/T 系统的可行性取决于它相别与其他方式的技术和经济的竞争力。技术的优势主要采用的是它和那些传统方式的热效率和电效率的对比。而经济方面的可行性主要针对太阳能系统单位能量产出减少的化石燃料消耗。不过对于经济方面的可行性分析强烈的依赖于一些商业因素：诸如一些传统能源的价格膨胀。当传统发电模式的经济消耗考虑进去后，很明显这样的太阳能系统的可行性会进一步的提升。

在前述的论文中不管是理论的还是实验研究的都得出整个设计的最大热效率可以达到 60%对于水冷式的对于液体形式会更高些。热效率的下降可能归咎于反射损失（因为光伏面板并不是选择性材料），此外因为增加的多余的层数造成了吸热表面和传热介质之间的热阻增加了造成的。因此保持光伏面板和集热板之间的薄膜层越薄是非常有必要的。

对于 PV/T 集热板来说虽然管板式设计表现出很不错的效果，但是平板管道的设计可能对于提高热传输是个非常不错的方式，考虑到通道可以做的足够薄。将热泵与 PV/T 系统结合的方式成为一种很有前途的设计，但是在设计的同时也应该考虑到电能的消耗对系统的评价来说，而这是对热泵的情况是非常关键的。这些理论可以说明为了更好的提高热传导效率应该减小整个传热通道的水力直径。为了更好地评估整个系统，对于光伏光热一体化的结构的热传导模型的建立是至关重要的。因为初始的研究也表明在现有的情况下，2D 和 3D 模型在消耗更多的计算时间的同时得到了的计算结果的精度和 1D 模型类似，所以以后可以对于专注于 1D 模型的优化上面。

总体来说 PV/T 系统直接生产生活热水比室内空气的加热来说显得更加有效，但是对于 PV/T 热水系统来说应该更加考虑到是系统提供一个多元化的服务诸如热水的生产，空间的加热和制冷。这样可以使整个系统更加的有效率和更加的经济性。评估来看 PV/T 空气冷却的集热板已经运用于干燥但是还没有发现 PV/T 热水系统这方面的研究。

所以综上所述以后的发展趋势可以概括了如下：

根据已知的理论和工程实践设计出设计新的效率更高结构便宜可行性更强的系统，现在问题是已经设计出来的系统在实际可行性方面还是不强，结构的成本回收时间比较

长，所以未来的工作很大一部分就是提高其效率和增强其可行性，减少系统的复杂性。

对于结构参数进行优化，也是下一步非常重要的步骤，在一个系统的多方面因素中，各个结构参数的对系统的影响最优化方面也有很大一部分工作要做。

对于实验室模拟的系统进行长期的户外实验，在当前一般进行的科研行动中，一般都是在实验室中进行了，而长期的户外实验数据严重缺乏在户外实验状态下系统的表现情况，还不是很明了。

对于系统的经济性和环保性进行分析，这也是下一步要重点进行的步骤，新能源一方面重要的特点就是他的环保性，而全过程碳排放评估是一个很非常重要的评估方法。而系统的经济性，是其以后的能否工程化重要指标。

六 参考文献

- [1] Nobuyuki H. Renewable energy: RD&D priorities: insights from IEA technology programmes; 2006.
- [2] “Renewables in global energy supply: an IEA facts sheet”, IEA/OECD; 2007.
- [3] Duffie JA, Beckman WA. Solar engineering of thermal processes. 2nd ed. New York: John Wiley and Sons Inc; 1991.
- [4] Kern JREC, Russell MC. Combined photovoltaic and thermal hybrid collector systems, In: Proceedings of the 13th IEEE PV specialist conference. 1978. P. 1153-7.
- [5] 王宝群, 姚强, 宋蕾, 卢志桓. 光伏/光热系统概况与评价. 太阳能学报[J] 2009;30(2).
- [6] IEA solar heating and cooling programme; 2007.
- [7] Hendrie SD. Evaluation of combined photovoltaic/thermal collectors. In: ISES international Congress and Silver Jubilee. 1980. P. 1865-9.
- [8] Florschuetz LW. Extension of Hottel-Willer model to analysis of combined photovoltaic/thermal flat plate collectors. Solar energy 1979;22;361-6.
- [9] 王宝群, 姚强, 宋蕾, 林汝谋. 太阳能光伏/光热集热器设计与性能研究. 燃气轮机技术[J] 2009;22(1).
- [10] Hottel HC, Willer A. Evaluation of flat-plate solar performance. In: Transactions of the conference on the use of solar energy. Vol, 2. Tucson, Arizona: University of Arizona Press: 1958.
- [11] Zondag HA, De Vries DW, Van Helden WGJ, Van Zolingen RJC, Van Steenhoven AA. The yield of different combined PV-thermal collector designs. Solar Energy 2003;74:253-69.
- [12] M.Arif Hasan, K.Sumathy Photovoltaic thermal module concepts and their performance analysis: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2010;14;1845-1859.
- [13] Duffie JA, Beckman WA. Solar engineering of thermal processes. 2nd ed. New York: John Wiley and Sons Inc; 1991.

- [13] Hendrie SD. Evaluation of combined photovoltaic/thermal collectors. In: ISES international Congress and Silver Jubilee. 1980. P. 1865-9.
- [14] Florschuetz LW. Extension of Hottel-Willer model to analysis of combined photovoltaic/thermal flat plate collectors. *Solar energy* 1979;22:361-6.
- [15] Zondag HA, De Vries DW, Van Helden WGJ, Van Zolingen RJC, Van Steenhoven AA. The yield of different combined PV-thermal collector designs. *Solar Energy* 2003;74:253-69.
- [16] 季杰, 程洪波, 何伟, 陆剑平, T. T. Chow. 太阳能光伏光热一体化实验研究. *太阳能学报*[J] 2005;26(2).
- [17] 季杰, 陆建平, 何伟, 周天泰, 裴刚. 一种新型全铝扁盒式PV/T热水系统. *太阳能学报*[J] 2006;8(9).
- [18] Kalogirou SA. Use of TRNSYS for modelling and simulation of a hybrid PV-thermal solar system for Cyprus. *Renewable Energy* 2001;23:247-60.
- [19] Kalogirou SA, Tripanagnostopoulos Y. Hybrid PV/T solar systems for domestic hot water and electricity production. *Energy Conversion and Management* 2006;47:3368-82.
- [20] Swapnil Dubey, G.N, Tiwari. Thermal modeling of a combined system of photovoltaic thermal solar water heater. *Solar Energy* 2008;82:602-612.
- [21] Ito S, Miura N, Wang K. Performance of a heat pump using direct expansion solar collectors. *Solar Energy* 1999;119:189-96.
- [22] Ji J, Liu K, Chow T, Pei G, He W, He H. Performance analysis of a photovoltaic heat pump. *Applied Energy* 2008;85:680-93.
- [23] Ji J, Liu K, Chow T, Pei G, He H. Thermal analysis of PV/T evaporator of a solar-assisted heat pump. *International Journal of Energy Research* 2007;31:525-45.
- [24] Ji J, He H, Chow T, Pei G, He W, Liu K. Distributed dynamic modeling and experimental study of PV evaporator in a PV/T solar-assisted heat pump. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2009;52:1365-73.
- [25] HD FU, G Pei, J Ji, TT Chow. Experimental study of a photovoltaic solar-assisted heat-pump/heat-pipe system. *Applied Thermal Engineering* 2012;40:343-350.
- [26] Pei G, Fu H, Zhu H, Ji J. Performance study and parametric analysis of a novel

heat pipe PV/T system. Energy37(2012)384-395.

[27] 许志龙 聚光型光伏& 光热一体机热交换系统的试验研究.太阳能学报, 2011 年 8 月, 32-8

[28] 许志龙 聚光型太阳能光电光热一体化装置研制.2011 年 1 月, 32-1