

# Parameter Calculation and Performance Analysis of Tower Solar Dynamic Power System

Mu LIU<sup>1</sup>, Yuming XING<sup>2</sup>

<sup>1</sup> School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing, China

<sup>2</sup> School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing, China

liumubuaa@sina.com, liumubuaa@hotmail.com

**Abstract:** The development, features and main devices of tower solar dynamic power system was introduced. The program design and some of the thermal parameters design of the power station was accomplished. Calculated the parameters of the key nodes in system process. Focused on the mechanism of the conversion between solar and thermal energy, and the thermal performance of the heat concentrator. Calculated and analyzed the performance parameters of the system, evaluated the system performance.

**Keywords:** solar energy; concentrator; receiver; thermal performance; peak power generation efficiency

## 塔式太阳能热动力发电系统参数计算与性能分析

刘 牧<sup>1</sup>, 邢玉明<sup>2</sup>

<sup>1</sup>北京航空航天大学, 北京, 中国, 100191

<sup>2</sup>北京航空航天大学, 北京, 中国, 100191

liumubuaa@sina.com, liumubuaa@hotmail.com

**摘 要:** 介绍了塔式太阳能热发电系统的发展、特点和主要组成装置, 完成了发电系统方案设计和部分热力参数设计以及系统流程各关键节点参数的计算, 侧重研究了太阳能光热转化特性规律和聚光集热器的性能特性。在文章的最后计算了系统的各性能指标, 并进行了分析并和评价。

**关键词:** 太阳能; 聚能器; 接收器; 热性能; 峰值发电效率

### 1. 引言

在当前化石燃料日渐枯竭的形势下, 各类新能源的发展日新月异, 太阳能热动力发电技术由于具有能量转换效率高, 发电量大, 发电成本低, 使用寿命长等优点而发展迅速。太阳能热动力发电系统按照聚光集热方式的不同可分为: 抛物槽式、碟式、塔式、太阳能热气流和太阳能热池等, 按照热功转换的热力循环方式不同可分为 Rankine 循环、Brayton 循环、Stirling 循环、Otto 循环等<sup>[1]</sup>。

塔式太阳能热动力发电系统 (Tower Solar Dynamic Power System, TSDPS) 利用定日镜跟踪太阳, 并将太阳光聚焦在中心吸热塔顶部的吸热器上, 在那里将聚焦的辐射能转变成热能, 然后将热能传递给热力循环的工质, 再驱动热机做功发电<sup>[2]</sup>。与其他类型相比, 塔式系统发电功率大、热量传递路程短、热损耗少、聚光比和温度较高 (通常可达到的聚光比为 300-1500, 运行温度可达 1000-1500℃), 具有广阔的应用前景和商

业价值, 目前各国政府都投入大量经费, 开展新的项目建设以及致力于太阳热资源的收集与高温蓄热、高温传热流体的储存与传输、防止蓄热系统的腐蚀结垢等技术领域的研究<sup>[3]</sup>。德国政府投资 4000 亿欧元在北非沙漠地带建造世界上最大的太阳能电站, 利用非洲丰富的太阳能资源向欧洲供电, 该项目建成后有望使未来欧洲约 15% 的电力能够由沙漠太阳能电站来供应。西班牙在建的索卢卡尔发电厂 2013 年竣工以后, 可以满足 18 万个家庭的用电需要, 相当于每年减排 60 万吨温室气体。

中国土地面积广阔, 具有居世界第二的丰富太阳能资源, 年辐射量的平均值为  $5.9GJ/(m^2 \cdot a)$ , 相当于  $2.4 \times 10^{12}$  吨标准煤。其中, 宁夏北部和南部、甘肃北部和中部、新疆南部和东南部、青海西部和东部、西藏西部和东南部等地区年日照时数大于 3000 小时, 年辐射总量高于  $6000MJ/(m^2 \cdot a)$ 。这些西部地区人口稀少, 荒漠面积较大, 适合建造塔式太阳能热动力电站。

## 2 系统设计与参数计算

### 2.1 系统方案设计

根据系统组成特点，确定塔式太阳能热动力发电

系统方案，其工作流程如图 1 所示，主要由蒸汽回路和蓄热回路组成，系统各主要设备见表 1。

电站主要设计参数：额定发电功率 1MW；年太阳辐射能 2256 kWh/m<sup>2</sup>；设计点辐射强度 750 W/m<sup>2</sup>；年日照时数 2555 小时<sup>[4]</sup>。

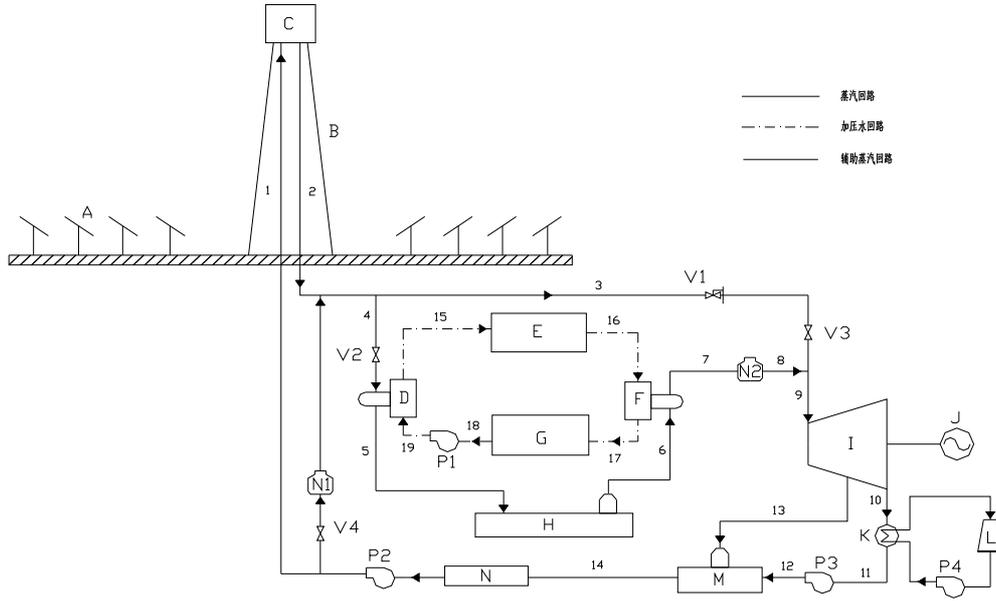


Figure 1. Working process of tower solar dynamic power system.

图 1. 塔式太阳能热动力发电系统流程图.

Table 1. Main system devices list  
表 1. 系统主要设备

设备编号	名称	设备编号	名称
A	定日镜	N	除氧器
B	塔	N1	蒸汽辅助锅炉
C	吸热器	N2	过热蒸汽辅助锅炉
D	蒸汽-加压水换热器	P1	加压水泵
E	高温蓄热罐	P2	给水泵
F	加压水-蒸汽换热器	P3	凝结水泵
G	低温蓄热罐	P4	冷凝水泵
H	低温蒸汽蓄热器	V1	减温减压阀
I	汽轮机	V2	阀门 2
J	发电机	V3	阀门 3
K	冷凝器	V4	阀门 4
L	冷却塔	M	回热器

塔式太阳能吸热器中直接通入高压水，高压水在吸热器中依次经过预热、蒸发和过热三个阶段，产生高温、高压的过热蒸汽。根据系统运行模式的不同，高温、高压的过热蒸汽的去处有两个方案：第一，可以经过一个减温减压阀 V3 后调节蒸汽的参数，直接去动力子系统中汽轮机膨胀做功；第二，可以经过阀门 V2 进入蓄热系统，首先和换热器 D 交换过热蒸汽的高温显热，然后微过热的蒸汽进入低温蒸汽蓄热器中存储起来，这样经过高温和低温两级蓄热，可以高效地将所收集到的太阳能存储到蓄热子系统中，同时，也可以方便将热量从蓄热子系统中提取出来。其中高温蓄热部分使用加压水在高温罐 E 和低温罐 G 中进行循环。

当系统中太阳能供应不足的情况下，可以利用蓄热子系统中能量来产生蒸汽。首先从低温蓄热器 H 中经过减压阀闪蒸产生低温蒸汽，然后进入换热器 F 将低温蒸汽加热成过热蒸汽，再经过一个补燃锅炉 N2，将过热蒸汽加热到汽轮机入口蒸汽参数要求，再进入汽轮机做功。

动力子系统当中的其它部件和常规电站中的热力系统一样，由于该电站设计容量为 1MW，汽轮机的设计参数很低，属于次中参数系列，回热系统只有一级，回热器 M 之后为除氧器。另外，太阳能电站往往建设在缺水或是水资源不很丰富的地区，汽轮机排汽的冷凝系统采用闭式冷却塔。

经过除氧后的给水，直接进入吸热塔，这样系统在太阳能供应充足的情况下，整个系统可以不经蓄热系统直接运行。如果当系统启动或者夜间运行时，可以将给水直接送入辅助锅炉 N1，利用化石燃料燃烧提供能量，向系统供应蒸汽。

## 2.2 关键节点参数确定

### 2.2.1 汽轮发电子系统参数设计计算

现假设给水流量  $Q_1=5800\text{kg/h}$ ；取汽轮机入口蒸汽参数为： $p_9=2.5\text{MPa}$ ， $t_9=350^\circ\text{C}$ ；抽气回热，凝结水被加热到抽气压力下的饱和温度， $p_{13}=0.5\text{MPa}$ ， $t_{13}=185^\circ\text{C}$ ，计算忽略水泵绝热压缩温升和水泵消耗的功。

$$w_{s,t} = \frac{P_e}{\eta_e} \quad (1)$$

$$Q_{13} \times h_{13} + (Q_9 - Q_{13}) \times h_{11} = Q_9 \times h_{14} \quad (2)$$

$$w_{s,t} = Q_9 \times (h_9 - h_{13}) + (Q_9 - Q_{13}) \times (h_{13} - h_{10}) \quad (3)$$

$$Q_{13} = \frac{h_{14} - h_{11}}{h_{13} - h_{11}} \times Q_9 \quad (4)$$

式中： $p_i$ ， $t_i$ ， $h_i$ ， $Q_i$  分别为节点  $i$  处水蒸气的压力、温度、焓和流量； $w_{s,t}$  为轴功， $P_e$  为额定功率， $\eta_e$  为发电机效率（取为 80%）。

动力部分所需要的额定热负荷：

$$P_{th} = Q_9 \times (h_9 - h_{14}) \quad (5)$$

$$Q_1 \times h_1 + P_{th} = Q_1 \times h_2 \quad (6)$$

取蒸汽在经过阀门 V1 之前的参数为： $t_2=400^\circ\text{C}$ ， $p_2=2.7\text{MPa}$ 。循环热效率：

$$\eta_t = \frac{Q_9 \times (h_9 - h_{13}) + Q_{10} \times (h_{13} - h_{10})}{Q_9 \times (h_9 - h_{14})} \quad (7)$$

若不计工质沿管路流动时的热量损失及水泵所消耗的功，且假设绝热经过减温减压阀前后水蒸汽焓值不变，则  $P_{th}$  即为太阳能集热系统所需要提供的热负荷。

### 2.2.2 聚光集热子系统热分析

接收器采用圆锥形空腔，加热面积  $170\text{m}^2$ ，出口蒸汽温度为  $400^\circ\text{C}$ ，压力  $2.7\text{MPa}$ ，接收器表面温度  $T_r = 700\text{K}$ ，辐射温度下的表面发射率  $\varepsilon_r = 0.81$ 。

接收器所接受的太阳辐射总功率：

$$P = I_b A_g \phi \rho_s \eta_0 \alpha_r \quad (8)$$

式中： $I_b$  为入射太阳辐射强度； $A_g$  为镜场地面面积，和塔高  $H$  与边缘半角  $\theta$  有关； $\phi$  为反射镜覆盖镜场面积百分数，一般取  $\phi \approx 0.45$ ； $\rho_s$  为反射镜利用系数（为了减少入射的有用太阳辐射能量的变化，恰当的调整反射镜的排列，使得中冬下午 3 时  $\rho_s$  有最佳值，则  $\rho_s$  随时间和季节的变化，从中夏中午的 0.78 到最佳时的 1.74，取平均 1.26）<sup>[5]</sup>； $\eta_0$  为入射到反射镜面的阳光中经反射实际到达接收器上的百分数，包括镜面的反射率（0.90），接收器玻璃外壳的透过率（约 0.95）和支撑结构的透过率（约 0.94）； $\alpha_r$  为接收器表面对入射阳光的吸收率，若接收器表面涂覆的选择性吸收为氧化铁或碳化钛，则当太阳辐射以小于  $75^\circ$  的角入射到接收器上时， $\alpha_r = 0.90$ 。

对方形镜场，有：

$$A_g = 4H^2 \tan^2 \theta \quad (9)$$

由式 (7) 所得到的到达中心接收器上的太阳辐射功率，还将有一部分向环境辐射，构成接收器的热损耗。假定这部分辐射损耗的比率为  $\beta$ ，则有：

$$\beta P = \varepsilon_r \sigma (T_r^4 - T_\infty^4) A_r \quad (10)$$

式中： $T_\infty$  为环境温度（300K）； $A_r$  为接收器的辐射表面积。

无遮阳的接收器视场的边缘角  $\theta$  可由以下经验公式求得：

$$\phi = 1.06 - 0.23 \tan \theta \quad (11)$$

接收器所接受的太阳辐射总功率：

$$P_0 = P_{th} + \beta P \quad (12)$$

### 2.2.3 蓄热子系统热分析

蓄热介质采用 10 个大气压的加压水，流量为  $Q_0=2210\text{kg/h}$ ，节点 19 和 15 的温度分别为  $t_{19}=20^\circ\text{C}$ ， $t_{15}=165^\circ\text{C}$ ，压力分别为 10 个大气压和 12 个大气压。对蒸汽-加压水换热器 D 和加压水-蒸汽换热器 F 分别有：

$$Q_0 \times c_w \times (t_{15} - t_{19}) = Q_1 \times (h_4 - h_5) \quad (13)$$

$$Q_0 \times c_w \times (t_{16} - t_{17}) = Q_1 \times (h_7 - h_6) \quad (14)$$

式中  $c_w$  为水的比热容。

至此，系统流程中关键节点参数全部确定（见表 2）。

Table 2. Parameters of key nodes.  
表 2. 系统流程中关键节点参数.

节点	工质	温度/°C	压力/MPa	流量/(kg/h)
1	水	152	3	5800
2	水蒸气	400	2.7	5800
3	水蒸气	400	2.7	5800
4	水蒸气	400	2.7	5800
5	水蒸气	300	2.7	(5800)
6	水蒸气	270	2.4	(5800)
7	水蒸气	300	2.4	(5800)
8	水蒸气	390	2.5	(5800)
9	水蒸气	390	2.5	(5800)
10	水蒸气	69	0.03	4999
11	水	69	0.03	4999
12	水	69	2.8	4999
13	水蒸气	185	0.5	801
14	水	152	2.8	5800
15	加压水	165	1.2	2210
16	加压水	165	1	2210
17	加压水	20	1	2210
18	加压水	20	1	2210
19	加压水	20	1.5	2210

### 3. 聚光集热器性能分析

由于接收器温度较高，为了降低对流损失，往往会在其外部套一层透明玻璃罩管，并将罩管内抽真空。在热平衡条件下，套有透明罩管的接收器的能量平衡方程式可以表示为：

$$I_b \rho \tau \alpha \gamma BL = Q_u + UA_r (T_r - T_a) \quad (15)$$

式中： $\rho$  为镜面反射率； $\tau$  为接收器透明罩管的透过率； $\alpha$  为接收器的吸收率； $BL$  为聚光器开口面积； $\gamma$  为接收器的光学采集因子； $Q_u$  为有用能量收益； $U$  为热损失系数。

式 (15) 中  $\rho \tau \alpha \gamma$  为光学效率  $\eta_{op}$  [6]，等号右边第二项表示吸收体的总热损失。接收器通过辐射向透明罩传热，然后再由透明罩通过对流与辐射向环境散热，形成最终的热损失。这时的热损失系数可表示为：

$$U = \left[ \frac{1}{h_w + \sigma \varepsilon_p (T_p + T_\infty)(T_p + T_\infty)^2} + \frac{1}{\sigma \varepsilon_r (T_r + T_p)(T_r^2 + T_p^2)} \right]^{-1} \quad (16)$$

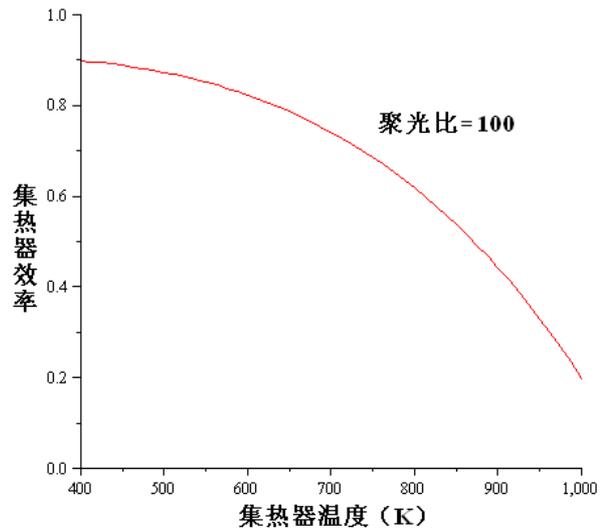
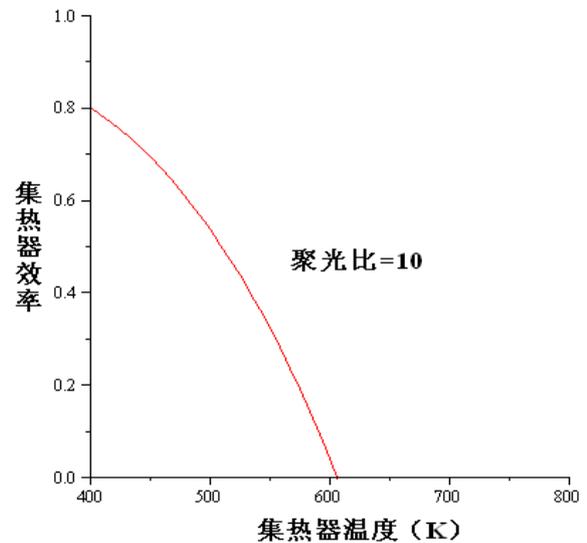
式中： $\varepsilon_p$  为透明罩发射率； $T_p$  为透明罩温度； $h_w$  为透明罩与环境的对流换热系数。

集热器的效率，根据定义，为接收器的有用能量收益与太阳入射辐射能量之比值：

$$\eta = \frac{Q_u}{BLI_b} = \eta_{op} - \frac{1}{C_G} \times \frac{U(T_r - T_a)}{I_b} \quad (17)$$

式中： $C_G$  为聚光器的几何聚光比，定义为：聚光器接受自然阳光的开口面积与接收器面积之比。

图 2 所示为不同形式的典型聚光集热器的效率和工作温度  $T_r$  之间的关系。图中效率曲线在纵轴上的截



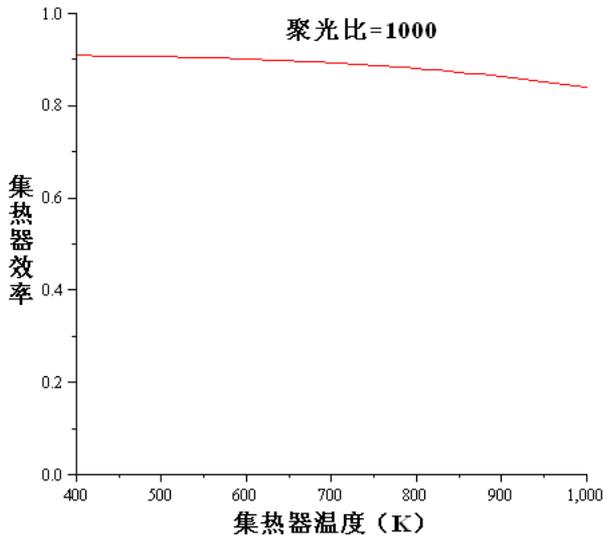


Figure 2. Curve: efficiency of heat concentrator

图 2. 集热器效率随工作温度变化曲线

距，为聚光集热器的效率极限。它由系统的光学效率  $\eta_{op}$  决定，即使接收器的热效率为 100%，总系统的效率也只能达到系统的光学效率。

#### 4. 发电系统性能估算

一般地，设计工况下，吸热子系统所能收集到太阳能量与朗肯循环所需热量之比定义为太阳倍数 (Solar Multiple, SM)，太阳倍数的大小决定了整个太阳能电站的容量因子 (Capacity Factor, CF) 大小和蓄热子系统大小，经常是通过技术经济比较，优化后求得一个太阳倍数 SM，于是可得到吸热子系统的容量：

$$P_{rec} = P_{th} \times SM \quad (18)$$

整个电站的容量因子 CF 不仅仅受到电站的系统结构和参数影响，同时受到电站的运行模式和电站所在地气象参数，以及当地电网负荷的影响，计算方法为：电站的年实际发电量除以电站以额定工况全年运行的发电量，或者是太阳能电站年实际满负荷发电小时数除以 8760 小时。

评价太阳能热发电系统总体性能的参数主要有：电站的年发电量、峰值太阳能发电效率、年平均太阳能发电效率，以及容量因子等。

$$P_{e,a} = \int_a P_e dt \quad (19)$$

$$\eta_{max} = \left( \frac{P_e}{DNI \times A} \right)_{max} \times 100\% \quad (20)$$

$$\eta_a = \frac{P_{e,a}}{A \times \int_a DNI dt} \times 100\% \quad (21)$$

式中： $P_{e,a}$  为年发电量； $\eta_{max}$  为峰值发电效率；DNI 为太阳辐射强度； $\eta_a$  为年平均发电效率。

对该塔式太阳能热动力发电系统性能进行估算，得到初步的性能参数，见表 3。系统的峰值太阳能发电效率为 26.3%，而年平均发电效率仅仅为 16.3%，主要是因为该电站的容量较小，太阳能镜场和吸热塔之间不是最优匹配，汽轮机入口参数较低，对应的朗肯循环效率低等多种原因造成的。

Table 3. Results of system performance

表 3. 系统性能估算结果

参数	单位	大小
电站容量	MW	1.0
镜子反射率	%	90
反射镜利用系数	%	78~174
镜场清洁度	%	94
集热器效率	%	72
蓄热效率	%	95
热功转换效率	%	24.6
峰值发电效率	%	26.3
厂用电率	%	12
SM		1.4
镜场面积	m <sup>2</sup>	20025
CF		0.29
DNI	W/m <sup>2</sup>	750
年平均发电效率	%	16.3

#### References (参考文献)

- [1] Wang Changgui, Cui Rongqiang, Zhou Huang. Power Technology Use New Energy [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003  
王常贵, 崔容强, 周篁. 新能源发电技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003
- [2] National Renewable Energy Laboratory Survey of Thermal Storage for Parabolic Trough Power Plants [R]. Cologne: National Renewable Energy Laboratory, 2002
- [3] J.A. Dafei, et al. Solar-Heat Energy Conversion Process [M]. Beijing: Science Press, 1980  
J.A.达菲等. 太阳能-热能转换过程[M]. 北京: 科学出版社, 1980
- [4] Yang Shiming, Tao Wenquan. Heat Transfer [M]. Beijing: Higher Education Press, 1980  
杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998
- [5] Guo Su, Liu Deyou, Zhang Yaoming, et al. Heliostat of Tower Solar Power System [J]. Solar Energy, 2006,(5)  
郭苏, 刘德有, 张耀明, 王军. 塔式太阳能热发电的定日镜[J]. 太阳能学报, 2006,(5)
- [6] TSOUTSOS T, GEKAS V, MARKETAKI K. Technical and Economical. Evaluation of Solar Thermal Power Generation [J]. Renewable Energy, 2003, 28(6): 873-886.