

# Performance Optimization and Analysis of Solar Dynamic Power System with Stirling Cycle

Zhang Yu, Xing Yuming

School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China

Email: chrisuzy@gmail.com

**Abstract:** Solar Dynamic Power system with Stirling Cycle (SC) has drawn global attention recently for its significant advantage in efficiency, system mass and reliability, which makes it a promising alternative for power supply. Since the Stirling Engine is the most important component of SC system, the operation efficiency of Stirling Engine plays a crucial role in the whole system performance. In this paper, a numerical model had been established based on some hypotheses, taking consider of both pressure drop and heat loss. And the real-coded genetic algorithm had been used for the performance optimization, which was carried out by original calculating program developed in VC. The contrast and analysis between the calculated results before and after optimization indicated the feasibility and advantage of this optimization algorithm, which can serve as a reference to the design and manufacture of Solar Stirling Power system.

**Keywords:** Solar Dynamic Power System; Stirling Engine; Genetic Algorithm; Optimization

## 太阳能斯特林发电系统的性能优化

张 宇, 邢玉明

北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191

Email: chrisuzy@gmail.com

**摘 要:** 太阳能斯特林发电系统以其高效率, 轻量化以及良好的可靠性受到了各国的广泛关注。作为太阳能斯特林发电系统的核心组件, 斯特林机的工作效率直接关系到整体系统的性能。本文建立了太阳能斯特林发电系统中斯特林机的数学模型, 考虑了流阻损失和热损失。并且运用实数编码遗传算法, 以循环效率作为优化目标对斯特林机进行了优化设计与分析。同时在 VC 平台编写了优化计算程序。优化前后的计算结果显示了该算法优化结果的可靠性。该优化结果可以为太阳能斯特林发电系统设计与制造过程提供参考。

**关键词:** 太阳能热动力发电系统; 斯特林机; 遗传算法; 优化

### 1 引言

随着人类社会的发展, 对能源的需求量也是飞速增长。然而以煤, 石油, 天然气为代表的常规矿物能源不仅面临着有限的储藏量这一严峻的事实, 而且利用常规能源引起环境污染问题也亟待解决。因此, 寻求并且利用能够替代矿物能源的可再生能源已经被提上议程。而太阳能作为一种能量巨大的清洁可再生能源, 其开发和利用受到了各国政府的重视。每秒钟到达地球的太阳辐射能量就相当于 500 万吨煤, 如果将太阳能有效利用起来, 能极大的缓解人类能源危机。美国能源部 (DOE)

早在上世纪 90 年代就制订了太阳能热电技术的发展规划, 其目标是到 2020 年, 全国太阳能热电系统总容量达  $2 \times 10^7$  KW; 德国计划到 2025 年太阳能电站向电网供电达到  $2.3 \times 10^7$  KW。随着人们对太阳能发电系统的研究深入, 太阳能斯特林发电系统以其高效利用太阳能方面的优势, 受到了各国的广泛关注。太阳能斯特林发电系统主要包括碟式聚能器, 接收器以及斯特林机三大部分。太阳能通过聚能器收集聚焦后, 由接收器接收并作为斯特林发动机的热源。

斯特林机作为一种将热能转化为机械能的动力机械, 自 1816 年发明至今, 已经经历了将近两个世纪的发展。它是一种外部加热的封闭循环活塞式发动机, 循环系统包括膨胀腔, 加热器, 回热器, 冷却器以及压缩

腔。内部一般封装氦气或其他惰性气体作为工质。依靠活塞的运动使得循环系统相关容积发生周期性变化，从而让工质在系统中往复流动。活塞在低温下压缩一定量工质气体，然后经过加热，气体在高温下膨胀，最后冷却膨胀气体从而完成一个完整的循环<sup>[4,7]</sup>。高温膨胀气体做功的量大于低温下压缩消耗的部分，两者的差值即为斯特林机的净机械功。

斯特林机作为太阳能斯特林发电系统中最核心的部件，其工作效率对整个系统的性能有至关重要的影响。截至目前，对斯特林机性能优化研究的文献仍然较少。本文应用实数编码遗传算法，在马提尼等温分析法的基础上对斯特林机的性能进行优化分析，以得到对实际设计中选择最佳工作参数具有指导意义的结论。

## 2 循环模型

为了便于分析，我们对斯特林机的实际工作过程作如下的简化假设<sup>[1,2]</sup>：

- 热交换设备（冷却器，加热器以及回热器）的换热过程是完善的。
- 循环系统中压缩腔工质温度和冷却器温度相等，膨胀腔工质温度和加热器温度相等。
- 膨胀腔和压缩腔容积按正弦规律变化。
- 循环工质符合理想气体定律，且没有泄露，循环中工质质量不变。

### 2.1 循环功率

可以将循环系统分为 3 部分：冷区、热区和回热区<sup>[6]</sup>。其中热区由膨胀腔和加热器组成，温度为  $T_H$ ；冷区由压缩腔和冷却器组成，温度为  $T_K$ ；回热区单独由回热器管路组成，温度为  $T_R$ 。

膨胀腔活塞运动规律为

$$X_d = l_p + R_c - R_c \cos \alpha - l_r \cos \beta \quad (1)$$

压缩腔活塞运动规律为

$$X_p = l_p - (l_r + R_c - R_c \cos(\alpha + \frac{\pi}{2}) - l_r \cos \beta') \quad (2)$$

其中  $l_p$  为活塞最大行程， $l_r$  为连杆长度。 $R_c$  为曲柄半径。 $\alpha$  为曲柄转角， $\beta$ ， $\beta'$  分别为膨胀腔和压缩腔的连杆转角。

即可以得到冷区容积为

$$V_K = V_c + DV_k = X_d A_{cy} + DV_k \quad (3)$$

热区容积为

$$V_H = V_e + DV_h = X_d (A_{cy} - A_r) + DV_h \quad (4)$$

系统循环总容积为

$$V_T = V_H + V_K + V_R \quad (5)$$

其中  $A_{cy}$  为汽缸横截面积， $A_r$  为活塞杆截面积。

$DV_h$  和  $DV_k$  分别为加热器和冷却器的无益容积， $V_R$  为回热器的流通容积。

回热器定性温度为

$$T_R = \frac{(T_h - T_c)}{\ln(\frac{T_h}{T_c})} \quad (6)$$

循环工质的总质量为

$$m_t = \frac{p_i V_H}{RT_H} + \frac{p_i V_K}{RT_K} + \frac{p_i V_R}{RT_R} \quad (7)$$

可以得到循环过程中瞬时压力为

$$p_i = \frac{m_t R}{\frac{V_H}{T_h} + \frac{V_K}{T_k} + \frac{V_R}{T_R}} \quad (8)$$

系统的循环功为

$$W_{out} = \int p dV_i \quad (9)$$

系统指示功率为

$$P_{out} = W_{out} \cdot \omega \quad (10)$$

其中  $\omega$  为斯特林机工作频率。

### 2.2 流动阻力损失

流动工质通过加热器、冷却器和回热器的压降可以表示为

$$\Delta p_i = k_i \cdot \frac{l_i \cdot f_i \cdot G_i}{\rho_i \cdot dh_i}, \quad i = h, k, R \quad (11)$$

其中  $f_i$  分别为加热器、冷却器以及回热器中工质的范宁摩擦系数。 $k_i$  为经验系数，对于加热器和冷却器  $k_h = k_k = 2$ ；对于回热器  $k_R = 1$ 。

流动工质通过加热器、冷却器和回热器的流阻损失功率为

$$\Delta P_i = \frac{2 \Delta p_i m_i tpc_i \omega}{\rho_i}, \quad i = h, k, R \quad (12)$$

其中  $m_i$  和  $tpc_i$  分别为工质通过加热器、冷却器和回热器的质量流量与比例时间。

则实际输出功率可表示为

$$P_i = \eta_{iso} P_{out} - \sum \Delta P_i, \quad i = h, k, R \quad (13)$$

$\eta_{iso}$  为等温功率修正系数。

根据实际输出功率  $P_i$  是否满足要求调整冷热腔温度  $T_k$  和  $T_h$ ，从而进行迭代计算。

### 2.3 热量损失

斯特林机的热量损失主要包括回热损失、活塞穿梭热损失、泵气损失、温度波动损失以及静态导热损失<sup>[3]</sup>。

#### 2.3.1 回热损失

$$\Delta Q_{re} = \frac{2}{N_{RE} + 2} F_R m_R c_v (T_h - T_k) \quad (14)$$

其中  $N_{RE}$  为回热器内的传热单元数。

#### 2.3.2 活塞穿梭热损失

$$\Delta Q_{sh} = \frac{Y_k \cdot Z_k \cdot X_p \cdot k_g (T_h - T_k) \cdot d_{cy}}{\delta_g \cdot l_p} \quad (15)$$

其中  $Z_k$  为确定缸壁和活塞材料的导热率和循环效率的系数

$$Z_k = \frac{1 + \lambda}{1 + \lambda^2} \quad (16)$$

$$\lambda = 1 + \frac{k_g}{2\pi\delta_g} \left( \frac{\lambda_{lc}}{k_{mc}} + \frac{\lambda_{tp}}{k_{mp}} \right) \quad (17)$$

其中  $\lambda_{lc}$  和  $\lambda_{tp}$  分别为缸壁和活塞壁的壁温波长,  $k_{mc}$  和  $k_{mp}$  分别为缸壁和活塞壁的导热率。

#### 2.3.3 泵气损失

$$\Delta Q_{pmp} = \frac{2\omega}{3\pi} \left( \frac{\omega d_{cy} \cdot c_p}{2k_g} \right)^{0.6} \left[ \frac{(P_{\max} - P_{\min}) \delta_g}{R T_R} \right]^{1.6} \cdot c_p l_p (T_h - T_c) \quad (18)$$

#### 2.3.4 温度波动损失

$$\Delta Q_{tf} = \frac{tpc_R \cdot m_R c_p (T_h - T_k) - V_R c_v (P_{\max} - P_{\min})}{2(T_h - T_k)} \cdot \omega m_i \cdot \Delta T_{Rf} \quad (19)$$

$\Delta T_{Rf}$  为回热器基体温度波动

$$\Delta T_{Rf} = \frac{tpc_R \cdot m_R c_p (T_h - T_k) - V_R c_v (P_{\max} - P_{\min}) m_i \omega}{\omega M_R \cdot c_{pm}} \quad (20)$$

其中  $M_R$  为回热器基体质量,  $c_{pm}$  为回热器基体比热。

#### 2.3.5 静态导热损失

静态导热损失可表示为

$$\Delta Q_{cd} = \int_{i=0}^{l_i} dq_{cd} \quad (21)$$

$$dq_{cd} = \frac{k_i \cdot A_{hi} \cdot \Delta t_i}{\Delta l_i}, \quad i = cy, R \quad (22)$$

其中  $k_i$  分别为汽缸和回热器在不同温度下的导热系数,  $A_{hi}$  为换热面积,  $\Delta T_i$  为传热温差。

上述各种热量损失之和为

$$\Delta Q'_{LOSS} = \Delta Q_{re} + \Delta Q_{sh} + \Delta Q_{pmp} + \Delta Q_{tf} + \Delta Q_{cd} \quad (23)$$

可得斯特林机的循环热损失为

$$\Delta Q_{LOSS} = \Delta Q'_{LOSS} - \Delta P_h - 0.5 \Delta P_R \quad (24)$$

理想等温循环的斯特林机供热量为

$$Q_E = \frac{Pi}{1 - \frac{T_k}{T_h}} \quad (25)$$

则循环中加热器提供的总热量为

$$Q_T = Q_E + \Delta Q_{LOSS} \quad (26)$$

发动机的实际循环效率为

$$\eta_s = \frac{Pi}{Q_T} \quad (27)$$

## 3 遗传算法性能优化

在优化算法的选择上, 考虑到遗传算法通过模拟自然进化过程来搜索最优解<sup>[5]</sup>, 能适应不同领域的优化要求, 在复杂整体优化问题中的优势较为明显。且实数编码的遗传算法尤其适用于高精度要求的连续函数优化问题。故本文采用实数编码的遗传算法来实现优化。

### 3.1 目标函数与优化参数确定

本文中将根据前述斯特林机循环模型计算得到的发动机实际效率作为目标函数。分析对发动机效率的主要影响因素可以确定优化的主要对象为发动机汽缸、活塞、加热器、冷却器和回热器的结构参数。确定 11 个优化参数的矢量形式  $OP(T_h, T_k, d_{cy}, d_r, l_p, l_k, d_k, l_h, d_h, l_R, d_R)$ , 对于其中的每一优化参数均在允许的实际范围内变化。

### 3.2 算法设计

#### 3.2.1 种群初始化

选取 100 组优化参数矢量  $OP_i, i=1..100$ , 作为初始种群。 $OP_i$  即相当于个体的染色体, 优化矢量内的每一优化参数即相当于染色体基因, 均用其实际允许范围内的随机数表示。

### 3.2.2 适应度评价

适应度值是遗传算法中判断个体优劣，决定该个体是否进入下一代进化的判据。本文遗传算法的适应度函数 eval 选择为斯特林机设计的优化目标函数，即  $eval_i = \eta_{si}$ 。

### 3.2.3 交叉

在两个体染色体  $OP_j$  和  $OP_k$  之间进行算术交叉，则交叉结果产生的新个体为

$$OP'_j = qOP_j + (1-q)OP_k$$

$$OP'_k = (1-q)OP_j + qOP_k$$

其中  $q$  选择为  $[0, 1]$  之间的随机数， $j, k$  随机选择，经过上述交叉后可得到 100 组子代个体。

### 3.2.4 变异

选定变异概率，然后对交叉产生的子代个体随机选择变异个体。假设被选中变异的个体为  $OP_k$ ，随机产生一个扰动方向  $\delta_k$ ，以  $OP_k$  为起点，沿  $\delta_k$  方向寻优，取最优点作为新的染色体，完成变异。

### 3.2.5 选择

根据轮盘选择原理，计算选择概率操作如下：

$$sum_{eval} = \sum_{i=1}^{100} eval_i$$

$$P_i = eval_i / sum_{eval} (i = 1, 2 \dots 100)$$

$$Q_k = \sum_{i=1}^k P_i (k = 1, 2 \dots 100)$$

生成  $[0, 1]$  之间随机序列  $rand_i (i=1..100)$ ，

对于每一随机数  $rand_i$ ，假如满足

$$Q_{k-1} \leq rand_i \leq Q_k$$

则染色体  $OP_k$  被选中，进入下一代。经过选择可以得到 100 组子代个体。

### 3.2.6 进化

将经过交叉、变异、选择之后得到的 100 组子代个体作为新的父代个体，进入下一步进化，重新进行适应度评价、交叉、变异和选择，如此迭代反复，随着进化过程的进行，群体中适应度较低的一些个体被逐渐淘汰，适应度较高的一些个体会越来越多，直至产生的解基本保持不变，所得解即可作为最优解。

## 4 优化结果分析

本文按前述模型与优化方法对一小型斯特林机的性能进行了模拟计算与结构优化。该斯特林机的设计

功率为 10KW，平均工作压力为 10MPa。发动机转速 1800 转/分。优化前，在实际允许范围内随机生成 100 组初始个体染色体组（第 1 代），即待优化的参数矢量组  $OP(T_{hi}, T_{ki}, d_{cyi}, d_{ri}, l_{pi}, l_{ki}, d_{ki}, l_{hi}, d_{hi}, l_{Ri}, d_{Ri})$ ，并分别计算出适应度值，亦即发动机的实际效率  $\eta$ ，如下图所示。

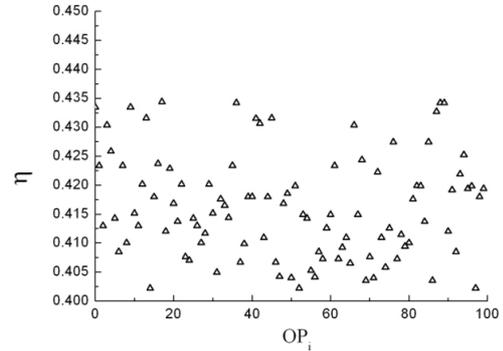


Figure 1. distribution of parameters-efficiency before optimization  
图 1.待优化的参数矢量组-效率分布

由图可见，随机生成的初始优化参数组经前述建立的模型计算得到的发动机实际效率分布在 0.400~0.435 之间，可以看出，未经优化的初始参数组合能够达到的最高效率在 0.435 附近。

采用实数编码遗传算法优化，设定 300 代演化，经过演化，将第 300 代个体的参数矢量组代入模型计算得到发动机实际效率  $\eta$ ，如下图所示。

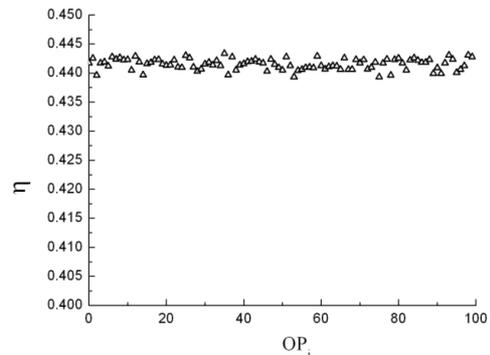


Figure 2. distribution of parameters-efficiency after optimization  
图 2.优化后的参数矢量组-效率分布

由图可见，优化后的参数组经计算得到的发动机实际效率集中分布在 0.443 附近，已经达到收敛要求。可以看出，优化后的参数组合得到的发动机实际效率均高于优化前的最高效率。

从优化前、后的参数组合中各选取一组，以便作优化结果比较。如下表所示：

**Table 1. parameters comparison before/after optimization**  
**表 1.优化前后参数对比**

优化参数	$T_h /K$	$T_k /K$	$d_{cy} /mm$	$d_r /mm$	$l_p /mm$
优化前	919.4	394.9	66.0	23.2	188.0
优化后	919.2	357.8	60.0	29.4	141.9

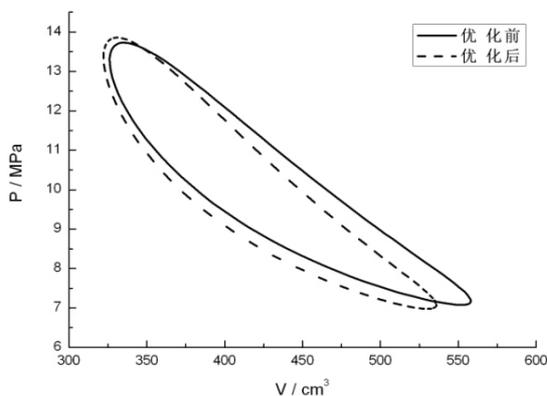
优化参数	$l_k /mm$	$d_k /mm$	$l_h /mm$	$d_h /mm$	$l_R /mm$
优化前	96.8	1.0	448.5	3.0	48.0
优化后	87.1	1.4	436.7	4.6	46.1

优化参数	$d_R /mm$	$\Delta P_{loss} /W$	$\Delta Q_{loss} /W$	$\eta$
优化前	53.9	1049.54	2798.63	0.406
优化后	50.0	713.25	2594.29	0.443

通过对优化参数的比较可以发现，优化后的发动机热腔温度  $T_h$  变化较小，而冷腔温度  $T_k$  较优化前降低，从而使得冷热腔温差增大，流阻功率损失  $\Delta P_{loss}$  和热损失  $\Delta Q_{loss}$  较优化前均有明显下降。优化后发动机效率为 0.443，较之优化前的 0.406 提高了 9.1%。优化效果明显。

优化前后的比较从发动机示功图上看更为明显，如下图所示。优化后在保证循环功基本不变的前提下，减少了所吸收的热量，从而使得效率提升。



**Figure 3. comparison indicator diagram**  
**图 3.优化前后发动机示功曲线对比**

## 5 结论

通过实数编码遗传算法对太阳能斯特林发电系统最重要的部件——斯特林机的结构参数及性能进行优化，并选取 10KW 斯特林发电系统作为算例，以及对优化前后的结构与性能参数作比较，我们可以看到该优化算法对斯特林机的结构参数优化结果合理，优化后性能提升明显。

同时，与其他优化算法相比，实数编码遗传算法并不仅仅得到一组最优解，而是得到在最优解附近的一组优化解的集合<sup>[8]</sup>。该算法的这一特点使得其在太阳能斯特林发电系统的优化问题上十分适合。众所周之，由于斯特林机对密封性的特殊要求，制造与生产斯特林机对工艺要求很高，严苛的加工精度成为太阳能斯特林发电系统广泛发展与应用的主要障碍。精度达不到要求对于斯特林机的性能影响及其严重。然而，假如在设计阶段，通过实数编码遗传算法对斯特林机的结构参数进行优化，可以得到一组不同结构参数的组合，它们同时能够满足性能最优。此方法可提高设计过程的灵活性，使得系统设计的可调节性大大增强，从而放宽了精度与工艺上的要求。对于太阳能斯特林发电系统的普及有重要意义，具有很大的优势和发展前景。

## References (参考文献)

- [1] Ulusoy, Necati. Dynamic analysis of free piston Stirling engines [D].Case Western University, 1994.
- [2] Martini, W. R. Stirling Engine Design Manual[R], DOE/NASA/3152-78/1, 1978.
- [3] Huang Hulin. The performance simulation of Solar Energy Stirling Engine [J].Journal of Solar Energy,2004, 25(5): 657-662 (Ch).  
黄护林.太阳能斯特林发动机的性能模拟[J].太阳能学报,2004, 25(5): P657-662.
- [4] Gao Yao. Investigation of 5kW Solar Dish Stirling System Performances [D].Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, College of Energy and Power Engineering, 2006.  
高瑶. 5KW 点聚焦太阳能斯特林发电系统的性能分析[D].南京: 南京航空航天大学能源与动力工程学院, 2006
- [5] Lei Yingjie, Zhang Shanwen, Li Xuwu, et al. genetic algorithm toolbox for MATLAB[M].Xian: Xidian University Press, 2004: (14-22) (Ch).  
雷英杰,张善文, 李续武, 等.MATLAB 遗传算法工具箱及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004: (14-22).
- [6] Wu Danni.The calculation and analysis of Stirling Engine cycle [J].Zhanjiang Ocean University, 1997, 17: (36-40)(Ch).  
吴丹妮.斯特林发动机的循环分析和计算[J].湛江海洋大学学报, 1997, 17: (36-40)(Ch)..
- [7] Jeffrey G. Schreiber. Developmental Considerations on the Free-Piston Stirling Power Convertor for Use in Space [R]. AIAA 2006-4015, 2006.
- [8] Terry L. Holst, Thomas H. Pulliam. Aerodynamic shape optimization using a real-number-encoded genetic algorithm[R]. AIAA 2001-2473, 2001.