

# 热源间定常态能量转换热机有限<sup>※</sup> 时间热力学分析和评估

孙丰瑞 陈林根 陈文振 (海军工程学院)

**〔提要〕** 本文从最常见的热源间热机装置简化出热源间以工质定常流动实现定常能量转换的热机模型,沿用 $\gamma$ 、 $\pi$ 、 $\Theta$ <sup>[4,6]</sup>等概念,并以工质吸、放热的传热面积之和定义了适合于该物理模型的“功率密度 $\omega$ ”概念,导出了 $\eta_0 - \omega$ 谱函数及最小传热面积原理,揭示了上述热机内在的基本流、阻、势关系。所得结论比活塞机模型更有工程实用价值。文中以查得的实际工程资料与设计方案对本文结论提供了旁证。针对蒸汽动力装置的实际过程提出了兼顾输出功率与热效率用有限时间热力学方法选择和评估实际动力装置,与热工参数最优化结果相比,效果令人满意。

主题词 有限时间热力学 卡诺循环 蒸汽动力装置 最优化设计

## 一、引言

由 Curzon 与 Ahlborn<sup>[1]</sup>开始的有限时间热力学研究使热机的热力学理论开始由静态分析向动态分析过渡,后来的研究大都采用热源间活塞式内可逆卡诺热机模型<sup>[2,3,4]</sup>。这种模型同常见的热源间热机装置——工质相继流过蒸发器、膨胀机、冷凝器、泵等设备而完成热机循环的蒸汽动力装置,在热动力机制方面有一定的差别。稳定工况时,这种装置中工质的全过程可以看成定常态连续流,适当考虑不可逆因素它就构成了一种新的模型,无论理论还是工程应用都要了解它的热动力学规律。

经典热力学的热机模型是可逆的,它只有一个基本目标函数,不考虑循环所需要的时间。因此,无论是活塞式模型还是工质定常态连续流模型,在最终以热效率为目标函数的循环分析上可不加区别。然而,对于热机的动态热力过程,则不能完全继承这种传统。它要分析对象中实在的不可逆因素的影响及过程所用的时间或进行的速率。就时间或速率来说,两种模型特点不同,应加以区别。

## 二、两源间工质以定常态连续流完成的内可逆卡诺循环分析

此处所述循环中,仅存在工质与热源间的传热不可逆性。工质由热源吸热及向低温热源

本文收到日期1987—12—07

※ 本文在中国工程热物理学会第六届年会(1988年)宣读,论文编号881064

放热分别以传热公式表示:

$$Q_1 = \alpha_1(T_1 - T_{w \cdot n \cdot 1})t_1 F_1 \quad (1)$$

$$Q_2 = \alpha_2(T_{w \cdot n \cdot 2} - T_2)t_2 F_2 \quad (2)$$

式中,  $\alpha$ 、 $T$ 、 $T_{w \cdot n}$ 、 $t$ 、 $F$  分别表示工质同热源间传热时的传热系数、热源温度、工质实际工作温度、过程所需要的时间及传热面积。角标“1”、“2”分别表示吸热与放热过程。对于本文的工质定常态连续流热机装置模型, 吸热、放热、工质膨胀作功等是同时进行的, 完成一个循环的时间无需讨论。活塞式模型, 完成一个循环所需要的时间  $\tau(t_1 + t_2)$ <sup>[5]</sup> 很重要, 其工质吸热、放热是经过同一壁面进行的, 而工质定常态连续流模型工质吸热、放热是经过不同的传热面进行的, 如何选择两个传热面积, 则是本文讨论的中心问题。它对于实际工程是很有意义的。将式(1)、(2)写成热流量的形式:

$$\dot{Q}_1 = \alpha_1(T_1 - T_{w \cdot n \cdot 1})F_1 \quad (1a)$$

$$\dot{Q}_2 = \alpha_2(T_{w \cdot n \cdot 2} - T_2)F_2 \quad (2a)$$

为了得出纯粹热力过程的内在规律, 作如下推导及讨论。

$$\dot{W} = \dot{Q}_1 - \dot{Q}_2 \quad (3)$$

与文献[4]同样的方法定义工质等熵热源比指数  $\gamma$

$$T_{w \cdot n \cdot 2}/T_{w \cdot n \cdot 1} = (T_2/T_1)^\gamma \quad (4)$$

于是

$$\eta_0 = 1 - T_{w \cdot n \cdot 2}/T_{w \cdot n \cdot 1} = 1 - (T_2/T_1)^\gamma \quad (5)$$

$$\dot{W} = \dot{Q}_1[1 - (T_2/T_1)^\gamma] \quad (6)$$

$$\dot{Q}_2 = \dot{Q}_1(T_2/T_1)^\gamma \quad (7)$$

定义  $\dot{\omega} = \dot{W}/(F_1 + F_2) \quad (8)$

$\dot{\omega}$  为按传热面积平均的功率密度, 由(8)与(1a)、(2a)、(4)、(6)、(7)等式可得

$$\dot{\omega} = 1 - (T_2/T_1)^\gamma / [\alpha_1(T_1 - T_{w \cdot n \cdot 1})]^{-1} + \{\alpha_2[T_{w \cdot n \cdot 1} - T_2/(T_2/T_1)^\gamma]\}^{-1} \quad (9)$$

由式(9)通过

$$(\partial \dot{\omega} / \partial T_{w \cdot n \cdot 1})_r, \alpha_1, \alpha_2 \dots = 0$$

可求得工质的最佳吸热温度

$$T_{w \cdot 1} = T_1[\delta + (T_2/T_1)^{1-\gamma}/(1+\delta)] \quad (10)$$

式中  $\delta = (\alpha_1/\alpha_2)^{1/2}$

由式(10)与式(4)可求得工质的最佳放热温度。它们与活塞式模型所得结果相同<sup>[4]</sup>。

将式(10)代入(9)可得:

$$\dot{\omega}_{\gamma \cdot m} = K T_1 [1 - (T_2/T_1)^\gamma] [1 - (T_2/T_1)^{1-\gamma}] \quad (11)$$

对于工质定常态连续流模型,  $F_1 \neq F_2$ ,  $\dot{\omega}$  是对于  $(F_1 + F_2)$  平均的。欲使式(11)成立, 除了满足工质工作温度的要求外, 还必须满足  $(F_1/F_2)$  的确定要求。当  $\dot{W}$  一定时, 由式

(1a)、(10)、(6)等可求得

$$F_1 = (1 + \delta) / \alpha_1 \cdot \dot{W} / T_1 \cdot \{[1 - (T_2/T_1)^\gamma][1 - (T_2/T_1)^{1-\gamma}]\}^{-1} \quad (12)$$

同样可求得

$$F_2 = (1 + \delta) / \delta \alpha_2 \cdot \dot{W} / T_1 \cdot \{[1 - (T_2/T_1)^\gamma][1 - (T_2/T_1)^{1-\gamma}]\}^{-1} \quad (13)$$

对  $F_1/F_2$  的确定要求以  $f_0$  表示

$$f_0 = (F_1/F_2)_0 = 1/\delta = (\alpha_2/\alpha_1)^{1/2} \quad (14)$$

称为最佳传热面积比。

以上分析表明,

当  $\gamma$  一定时, 热源间的工质定常态连续流热机在其工质工作温度满足最佳要求和传热面积满足  $f_0$  的要求情况下, 装置将具有最小的传热面积  $(F_1 + F_2)_{\gamma, \min}$ ; 其中  $\gamma = 0.5$  是诸个  $(F_1 + F_2)_{\gamma, \min}$  中最小的。

该结论虽是由两个恒温热源间的模型所得, 但借克劳修斯分割方法可推广于任意热源条件<sup>[4]</sup>, 只须  $(1 - \gamma)$  为有限值为条件<sup>[5]</sup>; 所以该结论具有普遍性, 可简称为最小传热面积原理。

### 三、最小传热面积原理应用简例<sup>[10]</sup>

以某实际蒸汽动力装置为例, 若装置实际  $(F_1/F_2)$  用  $f$  表示, 则该装置  $f/f_0 = 0.62$ , 与最佳比例偏差太大, 其工质工作参数与最佳要求比也有相应的偏差, 要提高装置的性能, 改进的余地相当大。按本文分析, 改进的原则措施很简单: 使工质工作温度尽可能满足最佳要求, 相应地使  $f \rightarrow f_0$ 。效果如何, 最终要工程实践证明。另一用途类似的装置, 恰巧其工质工作温度较前者接近最佳, 相应的  $f$  也接近  $f_0$ ; 后者的热效率较前者略高, 而装置比重低得很多(10%以上)。

两个类似装置的设计数据也证明上述简例的结果不是偶然的: 其中一个的  $f$  较简例更偏离  $f_0$ , 装置比重又增大; 另一个的  $f$  进一步接近  $f_0$ , 则比重也进一步变小。

两项工程实例与两项设计方案提供的信息表明, 最小传热面积原理具有工程实用价值。再补充以具体的技术条件约束, 既可对更合理动力装置的诞生作出贡献。

### 四、蒸汽动力装置实际过程的有限时间热力学分析评估<sup>[11]</sup>

经典热机热力学热机模型是略去一切不可逆因素的理想模型, 只能对如何提高热效率有所启示。因循环的热工参数选择本质上是对不可逆的实际热力过程进行的, 故只有考虑了不可逆性影响的模型才对热工参数选择有具体指导作用。

蒸汽动力装置涉及的不可逆过程包括工质同高、低温热源之间的传热过程、工质流经膨胀机的不可逆做功过程、泵及所有管路中的不可逆过程。经过分析, 可将其处理为选择或评估热工参数的一种理论模型: 工质同热源交换时, 其内部是可逆的, 外部传热过程是不可逆的, 其余过程均为可逆的。这是实际过程的最简单的带有一定热力学、动力学性质的模型。

对于某一设计任务或方案，在明确约束条件、确定目标要求后，将评估对象用克劳修斯分割的方法分成若干个有限元循环<sup>[4,6]</sup>，分割方式与数量根据热源与工质循环的情况而定。在计算或查得诸元循环的原始数据后，算出元循环的特征参数  $\gamma_i$ 、 $\Theta_i$ 、 $\delta_i^2$ 、 $\pi_i$  <sup>[4,5,6]</sup>，

$$\gamma_i = I_n(T_{w \cdot n \cdot 2} / T_{w \cdot n \cdot 1}) / I_n(T_2 / T_1)_i \quad (15)$$

$$\Theta_i = [(T_{w \cdot n \cdot 1} - T_1^\gamma T_2^{1-\gamma}) / (T_1 - T_1^\gamma T_2^{1-\gamma})]_i \quad (16)$$

$$\delta_i^2 = (\alpha_1 / \alpha_2)_i \quad (17)$$

$$\pi_i = \{(1 + \delta)^2 \cdot [(1 - \Theta)\Theta] / [\delta^2(1 - \Theta) + \Theta]\}_i \quad (18)$$

从而明确每个元循环在其可能的工况群域中的位置<sup>[5]</sup>。同时，还计算出诸元循环的  $\eta_i$ ， $\omega_i$ ， $f_i$  以及理想模型的  $\dot{W}$ ， $\dot{\omega}$ ， $f_i$ 。

将评估对象各特征参数及性能数据按约束条件与目标要求进行评价，得出评估结论与改进措施。评估步骤见图1、

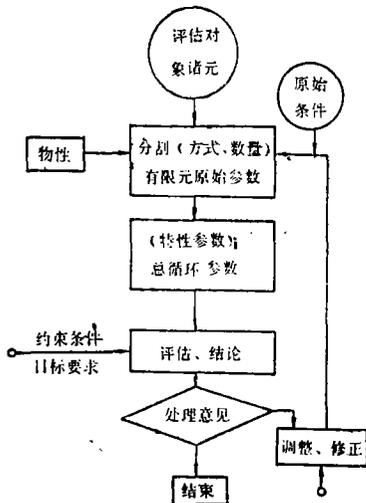


图1 评估过程

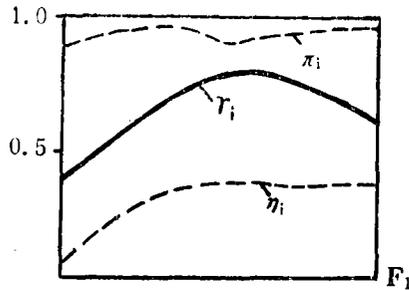


图2 评估对象特征参数

作者选定某实际蒸汽动力装置以装置比重最小为目标进行评估，克氏分割后算对有限元循环的特征参数如图2所示。按有限时间热力学的观点，该装置热工参数还有潜力通过调整以降低装置比重。

借助热效率——功率谱，作者调整了装置的结构参数和热工参数。调整结果得到一项最优化设计研究结果的旁证。理论模型分析的结果与该结果略有差别。如某温度仅差4℃，当采用  $\eta_i = 0.7$  (透平效率) 对所选结果进行修正，所得结果与最优化研究所得几乎完全相同。调整后的装置，总重量可降低20%，而热效率相对降低2.7%。特别需要指出的是，此处重量和效率同时降低并不是普遍规律，而是因为该装置相当多数的有限元循环的特征参数  $\gamma > 0.5$  的缘故 (按理论原则<sup>[4,5,6]</sup>，要求  $\gamma_i = 0.5$ )。相当多的舰用蒸汽动力装置，如TB-8，TB-9，则存在着既降低装置比重而又提高效率的可能性<sup>[5,6]</sup>。

### 五、讨 论

1. 式 (11) 与相应的  $\eta_0 = 1 - (T_2 / T_1)^\gamma$  构成了热源间工质定常态连续流内可逆卡诺

热机  $\eta_0 - \dot{\omega}_{r,m}$  谱。由于拟定式(8)的定义,该谱函数与活塞式模型所得的  $\eta_0 - P_{r,m}$  谱函数相同<sup>[6]</sup>,但是定常态连续流模型的最佳工况对于工质吸、放温度的严格要求与对吸、放热传热面积的严格要求是孪生的。

2. 当工质吸、放热温度偏离最佳时,仍可保持  $\eta_0 = 1 - (T_2/T_1)^{\gamma}$  及  $\dot{W}$ ,但此时要求的  $(F_1 + F_2)$  将增加,  $f$  偏离  $f_0$ ,  $\dot{\omega}_r$  下降,它相当于  $(F_1 + F_2)$  增加,这对设计与论证显然是有意义的。类似文献<sup>[6]</sup>定义  $\pi = \dot{\omega}_r / \dot{\omega}_{r,m}$  及  $\pi$  函数因子  $\Theta$ ,可得到两种模型的统一的“全息”谱,但是对于定常态稳定流模型  $\Theta$  不仅标志着温度的偏离,也标志着  $f$  的偏离。在设计及论证中,根据具体技术约束,可由该“全息”谱得到约束下最佳的工质工作温度及传热面积。

3. 对于已定的装置,  $F_1$ 、 $F_2$  及  $f$  都已确定,在上述“全息”谱中可以找到一条曲线  $|\dot{\omega}(r)$ ,概括其一切可能的变工况。这一原理对于确定设计方案及拟定运行方案都是有用的。

4. 随着有限时间热力学的发展,热机设计依据静态热力学理论加经验的状况将发生变革,因为传统的方法只能给出可行的方案,加上优化的方法也难以改变这一本质;而依据有限时间热力学的设计则是按着热力过程内在规律来设计,它将保证设计方案在现时的技术条件下的优秀与先进。

5. 用有限时间热力学方法对蒸汽动力装置热工参数的评估与选择方法,是按内在规律与目标要求来评估已有装置对热力过程的安排是否合理以及科学地重新安排实际装置的热力过程的方法。其最大特点是不带盲目性,例如,对热工参数的调整过程,在可能的工况域中有着极为明白的轨迹,起点与终点位置清晰。传统的方法无法与此相比,在传统理论与经验基础上使用最优化方法,也不能做到上述的“明白”与“清晰”。本文所述对蒸汽动力装置的分析及评估方法也同样适用于 GOGAS 装置和 DFC 装置等的分析和评估。

6. 本文介绍的是作者近期的研究成果。与以往的研究相比较,它向实际应用有了较大的进展。但是,在具体的实际应用工作中还需要解决许多问题。作者将进一步从事这方面的研究工作。可以预料,在不久的将来,有限时间热力学的理论和方法将在动力装置的设计和改造实践中得到应用。

### 参 考 文 献

- [1] Curzon F. L. and Ahlborn B.: "Efficiency of a Carnot Engine at Maximum Power Output", *Am. J. Phys.*, 43(1) 1975.
- [2] 严子波: "卡诺热机的最佳效率与功率间的关系", *工程热物理论*, 6(1) 1985.
- [3] 方光耀: "二源热机的输出功率与热效率", *内燃机学报*, 3(3) 1985.
- [4] 孙丰瑞: "任意两个以上热源的热机循环工作温度合理性的有限时间热力学分析", *工程热物理学第五届年会论文*, 851060 (1985).
- [5] 孙丰瑞、赖锡楠: 工质与低温热源工作温度的有限时间热力学分析, *全国高校工程热物理第二届学术会议论文集*, 科学出版社, 1986.
- [6] 孙丰瑞、赖锡楠: 热源间热机的“全息”热效率—功率谱, *工程热物理学学会工程力学与能源利用学术会议论文*, 861068 (1986)
- [7] Andresen B. et al: *Thermodynamics in Finite Time: Extremals for Imperfect Heat Engines*,

*J. Chem. phys.*, 66, 4 (1977).

- [8] Andreev B. et al: Thermodynamics in Finite Time. I. The Step—Carnot Cycle, *Phys. Rev. A*, 15(5) 1977
- [9] Salamon P. et. al: Thermodynamics in Finite Time. II. Potentials for Finite Time Processes, *Phys. Rev. A*, 15(5) 1977.

## 简 讯

中国造船工程学会轮机学术委员会锅炉、涡轮机学组和上海市航海学会轮机专业委员会联合于1988年11月1日至11月5日在安徽省芜湖市召开了1988年学术年会。参加会议的代表有来自全国十四个单位的教授、高级工程师、讲师、工程师及有关刊物编审、编辑等共三十四名。

锅炉涡轮机学组组长周渭镐同志主持会议并讲了话。上海市航海学会轮机专业委员会主任钱永年代表上海市航海学会轮机专业委员会讲了话。

会议收到论文三十二篇，会上宣读的论文有五篇。分别由锅炉涡轮机学组副组长闻雪友高级工程师，钟芳源、龚三省教授及学组成员张葆华教授就国产斯贝发动机、高效低噪风帆、船舶锅炉及现代船舶燃煤汽轮机动力装置的有关技术及发展进行了交流。上海船舶运输科学研究所文才萃工程师在大会上代表交通部船舶节能技术服务中心喻钟麟主任宣读了论文“煤碳在船舶上重新应用的可行性论证”。

学术交流分两个组进行，与会代表对交流的论文进行了热烈和认真的讨论，提出了许多有价值的观点和意见，使论文作者和与会代表得益不浅。

学术交流后由两个学会的学组员扩大会评出优秀论文十二篇。

会议期间，在周渭镐组长主持下召开了锅炉涡轮机学组成员会议，与会的十三名学组成员出席了会议。对1989年学术活动的内容、地点及下一届学组改选的有关问题进行了讨论。

会议组织参观了空军五七二〇厂的飞机力修车间，并以极大的兴趣观看了飞机试飞表演。

中国造船工程学会学术委员会和上海市航海学会对本次学术年会给予了指导和支持，保证了会议的圆满成功。空军五七二〇厂招待所的领导同志们对会议给予大力帮助和良好的服务。

(齐 文)

# JOURNAL OF ENGINEERING THERMAL ENERGY AND POWER

NO.2 1989

## CONTENTS

### Finite Time Thermodynamics Analysis and Evaluation for a Heat Engine with Steady-state Energy Conversion between Heat Sources

.....Sun Fengrui, Chen Lingen  
Chen Wenzhen (1)

*Abstract*

Presented in this paper is an analysis of the finite time thermodynamics for a heat engine with steady-state energy conversion between heat sources. With respect to the actual process existing in a steam power plant, a finite time thermodynamics method taking account of both the output power and heat efficiency has been put forward to select and evaluate an actual power plant. The results obtained are found to be in good agreement with those of the thermotechnical parameter optimization method.

*Key words:* Finite time thermodynamics, Carnot cycle, Steam power plant, Optimized design.

### Finite Time Thermodynamics for Heat Engines:

Theory and Applications.....Chen Lingen,  
Sun Fengrui, Chen Wenzhen (7)

*Abstract*

This paper presents a review of the finite time thermodynamics for heat engines in respect of the following aspects: the study of Newton law system, an analysis of thermal resistance and other irreversible loss models effects as well as finite reservoirs and source-type reservoirs effects, and finally, the application of heat engine design and its evaluation.

*Key words:* modern thermodynamics, Carnot cycle, endoreversible cycle, heat engine, optimal design.

### The Structural Analysis of a Speed Governing System for a Marine prime Mover.....Li Feng (15)

*Abstract*

This paper gives a theoretical analysis of the speed governing system for a