

关于 CA 效率、不可逆热机和有限时间热力学发展

陈林根 孙丰瑞 陈文振
(海军工程学院)

〔摘要〕 著名的 Curzon-Ahlborn 效率 η_{CA} 是由 El-Wakil 于 1962 年最先导出的,不可逆热机的概念也是 El-Wakil 最早建立的,有限时间热力学正在由物理学向工程学发展,并将使工程热力学产生巨大变革。

关键词 有限时间热力学 述评

1 引言

1826 年,卡诺开创了一个新的科学领域——热力学。卡诺的研究表明,工作于高温热源 T_H 和低温热源 T_L 间的任何热机,其效率均不可能超过 $\eta_c = 1 - T_L/T_H$,达到 η_c 的条件是热机可逆运行,即在整个热力过程中系统保持内平衡,系统和环境的总熵不变,且过程进行的时间为无限长,对热机而言,此时的功率输出为零。由于系统和环境之间的交换速率不为无限小,系统不能保持内平衡,过程时间是有限的。为了研究有限时间内完成的热力过程的性能特点,热力学派生出了一个新分支——有限时间热力学。

2 CA 效率:1962 年 El-Wakil 的发现^[1]

有限时间热力学研究得到的最早也是最

著名的结果是:工作于恒温 T_H, T_L 热源间的卡诺热机,当热机中工质由于传热不可逆性(热阻)而与热源存在温差,且热源与工质间的传热服从牛顿(线性)定律时,热机(称为无限热容热源牛顿定律系统内可逆卡诺热机)最大功率输出时的效率为 $\eta_m = 1 - (T_L/T_H)^{0.5}$ 。由于 η_m 与 η_c 一样仅与热源温度有关,与传热系数等无关,近年来,常用的一些热机循环(如 Otto 循环、Diesel 循环、Brayton 循环、和 Atkinson 循环等),在可逆运行条件下最大功输出时的效率也为 η_m ,或与 η_m 相当接近,因此这一结果相当乐观。

10 多年来,国内外研究人员,包括笔者在内,均认为是加拿大学者 Curzon 和 Ahlborn^[2]于 1975 年首次导出以上结果,为此 η_m 也被称为 Curzon-Ahlborn 效率或 CA 效率,记为 η_{CA} 。最近,笔者在研究有关动力装置的文献时发现, $\eta_{CA} = 1 - (T_L/T_H)^{0.5}$ 的真正导出者,并非 Curzon-Ahlborn,而是美国动力工程专家 El-Wakil^[1]。早在 1962 年,El-Wakil

收稿日期 1992-11-12 定稿 1993-03-12

本文联系人 陈林根 男 28 武汉 430033

在其《Nuclear Power Engineering》一书中,就导出了这一结果。因此,将热传导引入热力学循环分析,建立内可逆循环模型,分析热机效率—功率特性,是 El-Wakil 对热力学发展的一大贡献。13 年之后,热机循环的有限时间特性引起了物理学家们的注意,Curzon 和 Ahlborn 的工作为有限时间热力学的创立和发展起了推动作用。在强调 CA 效率普遍性和重要性时,不能忽略 El-Wakil 的开创性工作。

关于 CA 效率本身,笔者认为其也有一定的局限性:(1)CA 效率并非实际热机的最高效率界限。当热机并非工作于最大功率点时,对仅计入热阻损失的热机,其效率可以大于 η_{CA} ,因为 η_{CA} 仅为最大功率时的效率界限;(2)CA 效率对实际热机的普遍性是有条件的。即便是工作在最大功率点的热机,当热源为有限热容,或热源与工质间的传热服从牛顿定律以外的导热规律时,其效率界限也并非 η_{CA} ,而有限热容热源和复杂的导热规律恰是实际热机所具有的最常见特性;(3)导出 CA 效率的理论模型为仅计入热阻损失的内可逆热机循环,而实际热机中则还存在着如热漏、摩擦等其它不可逆损失,为不可逆热机循环,这也将使 η_{CA} 的指导意义减少。当务之急应是全面深入研究热力学循环中的各种不可逆机理,建立完备的不可逆循环模型。

3 不可逆热机:需要加以完善的热力模型

鉴于内可逆循环模型的局限性,为了更好地分析实际热机循环的物理本质特性,对实际热机的设计提供指导,近年来一些学者建立了一些不同的不可逆热机模型。如 Howe^[3]在 1982 年提出用一常数 ψ (小于 1)与内可逆热机效率相乘表示不可逆热机的

效率

$$\eta = \psi(1 - T_{wL}/T_{wH}) \quad (1)$$

式中 T_{wH} 、 T_{wL} 为工质工作温度。严子浚^[4]在 1989 年提出用不可逆度 I 表示热机中除热阻外所有的不可逆损失,有

$$\eta = 1 - IT_{wL}/T_{wH} \quad (2)$$

笔者发现,与式(1)、(2)类似的不可逆热机模型其实 El-Wakil 在 1962 年的专著中早已建立,他用 i 表示由内不可逆性引起的不可用能分量,有

$$\eta = 1 - (i + 1)T_{wL}/T_{wH} \quad (3)$$

由式(1)–(3)不难看出,几种不可逆模型中关于内不可逆分量的定义有如下关系:

$$I = i + 1 \quad (4)$$

$$\psi = (1 - IT_{wL}/T_{wH}) / (1 - T_{wL}/T_{wH}) \quad (5)$$

可见,El-Wakil 的工作有着超前性的意义。

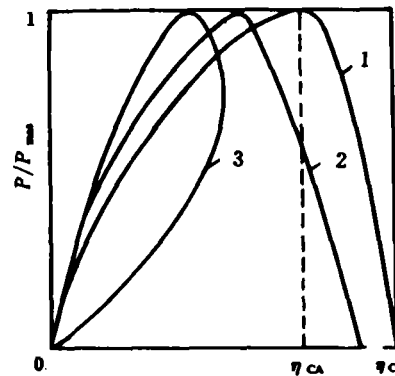


图1 热机效率功率特性

另一方面,笔者最近的研究则表明,上述几种不可逆热机模型虽在一定范围内有意义,但却与实际热机的效率—功率特性关系具有本质区别,见图1。图中曲线1为内可逆热机的效率—功率特性,曲线2为上述不可逆热机模型的效率—功率特性,曲线3为实际观测到的不可逆热机特性。由图可知,上述

的不可逆热机特性与内可逆热机特性定性相同,而与实际热机特性有定性区别。

当然,从工程应用角度来讲,人们只注重热机的最佳特性部分,即效率、功率协调最优的部分,从零效率和零功率点到最大功率点附近这一区域才是实际选用的范围,因此上述不可逆模型在这一区域内有一定的意义。在应用方面,笔者以为式(1)所示 Howe 的模型具有工程意义,如对蒸汽动力装置,在考虑传热特性的基础上,再用蒸汽透平的内效率 η_i 计入内部损失,用式(1)即可方便地估算最优性能。

4 有限时间热力学:从物理学到工程学

把热传导引入热力循环分析,始于工程专家 El-Wakil^[1],但其深入发展得益于 Curzon-Ahlborn, Andresen, Ondrechen, Berry, Ross 和 Rubin 等一大批理论物理、化学物理、物理化学等学科的专家学者的巨大工作。在国外,从 1975—1985 年间,是物理学工作者进行大量研究的时期。研究成果大多发表在物理学杂志上,如《Am. J. Phys.》、《J. Appl. Phys.》、《Phys. Rev. A》、《J. Phys. Chem.》和《J. Chem. Phys.》等。在经历 2—3 年的暂时低谷后,一大批工程学专家投入了该领域的研究,并开始探讨有限时间热力学的工程应用问题,大量的论文发表在 30 多种国内外有关工程刊物上,如《Energy》、《Sol. Energy》、《科学通报》、《自然物理学报》、《工程热物理学报》等。

在研究内容上,除了寻找一些新的理论界限外,国外学者大多开始寻找分析方法对实际热能装置进行研究、分析,以指导工程实践,大大丰富了工程热力学与能源利用分析

的内容。笔者亦已开始用有限时间热力学理论指导研究舰船蒸汽动力装置和舰船内燃机动力装置的参数选择与性能分析,并指导制定舰船制冷、空调装置的改装方案。一俟实验室改装成功,即可在实际舰船上实施。有关分析已经表明将这新的理论用于工程实践时,将会挖掘出很大的节能潜力。

5 结束语

有限时间热力学分析最关键的一点就是在热力分析中引入时间相关有限速率传热过程分析。因此在建立以热传导为基础的经典热力学公理体系中^[5],有限时间热力学起了很重要的作用。美国学者 Bejan^[6]认为,有限时间热力学与几何热力学、耗散分析、熵产分析等新学科将引起热力学的革命性变革。而这种变革定将引起热能动力、能源工程专业的巨大发展。

参 考 文 献

- 1 El-Wakil M M. Nuclear power engineering. New York, McGraw-Hill, 1962
- 2 Curzon F L, Ahlborn B. Efficiency of a Carnot engine at maximum power output. Am J. Phys., 1975, 43 (1), 22-24
- 3 Howe J P. The maximum power, heat demand and efficiency of a heat engine operating in steady state at less than Carnot efficiency. Energy, 1982, 7(4), 401-402
- 4 严子浚. 不可逆卡诺热机 η_P 最大时的 η 和 P . 热能动力工程, 1989, 4(6): 1-6
- 5 Bejan A. Advanced engineering thermodynamics. New York: Wiley, 1988
- 6 Bejan A. A second look at the second law. Mec. Engng., 1988(May), 58-65

(154)Thermoeconomic Analysis of the Feasibility of a Home-made 3000 t/day MSF Seawater Desalination SystemHu Sangao, et al. (*Beijing Postgraduate Department under North China Power Engineering Institute*)

Employing a thermoeconomic analysis method and taking account of the specific conditions prevailing in China, the authors have made a relatively detailed thermoeconomic analysis of a 3000 t/day MSF seawater desalination system and come up with some useful conclusions, which can serve as a necessary basis for furthering the realization of the design of a home-made MSF seawater desalination system. **Key words:** *seawater desalination, thermoeconomic analysis*

(158)A Pair of New Quality Factors of a Thermodynamic Cycle.....Yan Zijun (*Xiamen University*)

In view of the defectiveness of current thermodynamic quality factors and the inability of replacing them with finite-time exergoeconomic quality factors, this paper proposes a pair of new quality factors called the ecological quality factors. The significance of such quality factors lies in the fact that they can determine whether a thermodynamic cycle is operating in the optimum condition based on a well-balanced compromise between the function rate and function rate dissipation. **Key words:** *finite-time thermodynamics, thermodynamic cycle, quality factor, ecological optimization criteria*

(162)On Curzon-Ahlborn Efficiency, Irreversible Heat Engines and the Development of Finite-Time Thermodynamics.....Chen Lingen, et al. (*Naval Academy of Engineering*)

The famous Curzon-Ahlborn efficiency η_{CA} was first deduced by El-Wakil in 1962. The irreversible heat engine model was also first set up by El-Wakil. The finite-time thermodynamics is currently undergoing a development from physics to engineering and may well bring about tremendous changes in engineering thermodynamics. **Key words:** *finite-time thermodynamics, overview*

Edited and Published by Editorial Staff of Journal of	Cable: 6511, Harbin, China
Engineering for Thermal Energy and power	Post Code Number 150036
Printer: Printing House of Harbin Institute of Technology	ISSN1001-2060
Address: P. O. Box 77, Harbin China	Periodical Registration: CN 23-1176/TK
	Distributed by China International Book Trading Corporation, P. O. Box 399, Beijing, China