

热源间热机的“全息” 热效率—功率谱

孙丰瑞 赖锡棉

(海军工程学院)

[提要] 本文定义了输出功率弱化系数 π 及 π 函数因子 Θ ,建立了二源间内可逆循环的“全息”热效率—功率谱。借助克氏微循环或有限元循环概念,该全息谱能概括一切可能的任意热源间热机循环,可供热源间热机循环工作参数合理性的有限时间热力学分析。

主题词 现代 热力学 卡诺循环 热机 可逆循环

一 引 言

“有限时间热力学”这一名词出现的时间不长,尚未见到全面阐述其原理、方法与应用的著作。就其含义来看,凡在有限时间内发生的带有热现象的过程,工作中带有热现象的装置与系统,都应该是有限时间热力学所研究的对象,它甚至包括动、植物的(有限时间内的)生命过程,新陈代谢过程。因此,有限时间热力学的研究和应用是有着广泛的前景的。

就对动力装置的分析而言,以有限时间热力学分析热机兼顾热效率和输出功率 P 比传统的热力学热机理论更接近实际情况。文献 $[4]$ 提出了工质等熵热源温比指数 γ 的概念,借助 γ 得到了二源间内可逆卡诺循环的热效率 η_0 及其对应的最大的输出功率 P 和所要求的工质工作温度 T_w 的函数关系:

$$\eta_0 = \eta_0\left(\frac{T_2}{T_1}, \gamma\right) \quad (1)$$

$$P = P(K, T_1, \frac{T_2}{T_1}, \gamma); K = \frac{\alpha\beta}{(\sqrt{\alpha} + \sqrt{\beta})^2} \quad (2)$$

$$T_w = T_w(\delta, T_1, \frac{T_2}{T_1}, \gamma); \delta = \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}} \quad (3)$$

• 来稿日期:1987.12.7 本文第一稿在中国工程热物理学会工程热力学与能源利用委员会1986年年会上宣读,编号为861068。

可见,当热源温度 T_1 、 T_2 与工质热源吸热和冷源放热传热系数 α 、 β 一定时, η_0 、 P 、 T_w 都只与 γ 有关。文献[5]推广[4]的结论,证明了只要 $(1-\gamma)$ 为有限值,[4]的结论具有普遍性。由于实际因素的影响,热源间的热机工质工作温度不可能完全满足[4]提供的函数关系,因而得不到相应的最大功率 P 。本文将探讨两热源间内可逆卡诺循环在一切可能的工质工作温度下的 η_0 和输出功率 P' ,拟称它为两热源间内可逆卡诺循环的“全息”热效率——输出功率谱。

二 两恒温热源间内可逆卡诺循环的最佳热效率、功率谱“ η_0-P ”

文献[4]以

$$\eta_0 = 1 - \frac{T_{w2}}{T_{w1}} = 1 - \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^\gamma; \quad (0 \leq \gamma \leq 1) \quad (4)$$

表示两恒温热源间内可逆卡诺循环的一切可能的热效率。其中, T_{w2} 、 T_{w1} 分别表示内可逆卡诺循环工质等温吸热与等温放热时的温度,简称工质温度, γ 为工质等熵热源比指数。文献[2]与[5]以不同的方法导出了 η_0 及其对应的最大输出功率 P 之间的关系。

$$P = \frac{\alpha\beta}{(\sqrt{\alpha} + \sqrt{\beta})^2} \left(T_1 - \frac{T_2}{1-\eta_0}\right)\eta_0 \quad (5)$$

为便于分析,文献[4]把该式改写为

$$P = KT_1 \left[1 - \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^\gamma\right] \left[1 - \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{1-\gamma}\right] \quad (5a)$$

文献[4]导出满足式(5)时工质工作温度必须符合的条件,引入 $\delta = \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}}$,该条件可写为

$$T_{w1} = T_1 \frac{\delta + \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{1-\gamma}}{1 + \delta} \quad (6)$$

$$T_{w2} = T_1 \frac{\delta \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^\gamma + \frac{T_2}{T_1}}{1 + \delta} \quad (7)$$

对于两热源间的内可逆卡诺循环,当热源温度与传热系数一定时,对应于确定的 γ 值, η_0 、 P 、 T_{w1} 及 T_{w2} 都是唯一的。在 γ 域 $0 \leq \gamma \leq 1$ 上,式(4)、(5a)、(6)、(7)概括了两热源间内可逆卡诺机的一切最佳情况,其中最大的 P ,即 P_m ,发生于 $\gamma = 0.5$,相应的效率 η_m 及工质吸放热温度均由该 γ 值确定,故式(4)、(5a)称为两源内可逆卡诺机的最佳热效率、功率谱或“ η_0-P ”谱,式(6)、(7)为该谱的充要条件。 η_0-P 谱及其充要条件随 γ 的变化规律由以下诸式可知

$$\frac{\partial \eta_0}{\partial \gamma} = \left(\ln \frac{T_1}{T_2} \right) \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^\gamma \quad (8)$$

$$\frac{\partial^2 \eta_0}{\partial \gamma^2} = - \left(\ln \frac{T_1}{T_2} \right)^2 \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^\gamma \quad (9)$$

$$\frac{\partial P}{\partial \gamma} = K T_1 \left(\ln \frac{T_1}{T_2} \right) \left[\left(\frac{T_2}{T_1} \right)^\gamma - \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{1-\gamma} \right] \quad (10)$$

$$\frac{\partial^2 P}{\partial \gamma^2} = - K T_1 \left(\ln \frac{T_1}{T_2} \right)^2 \left[\left(\frac{T_2}{T_1} \right)^\gamma + \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{1-\gamma} \right] \quad (11)$$

$$\frac{\partial T_{W1}}{\partial \gamma} = T_1 \left(\ln \frac{T_1}{T_2} \right) \frac{1}{1+\delta} \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{1-\gamma} \quad (12)$$

$$\frac{\partial^2 T_{W1}}{\partial \gamma^2} = T_1 \left(\ln \frac{T_1}{T_2} \right)^2 \frac{1}{1+\delta} \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{1-\gamma} \quad (13)$$

$$\frac{\partial T_{W2}}{\partial \gamma} = - T_1 \left(\ln \frac{T_1}{T_2} \right) \frac{\delta}{1+\delta} \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^\gamma \quad (14)$$

$$\frac{\partial^2 T_{W2}}{\partial \gamma^2} = T_1 \left(\ln \frac{T_1}{T_2} \right)^2 \frac{\delta}{1+\delta} \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^\gamma \quad (15)$$

或者绘制出谱图 $\eta_0(\gamma)$ 、 $P(\gamma)$ 及其充要条件图线,见图1、2、3给出 T_1 、 T_2 、 α 、 β 的具体值由微机绘制的谱图及相应的充要条件图线。

当工质的吸、放热温度偏离充要条件时,仍可由式(4)确定其 γ 值及相应的热效率,但其输出功率 P' 将小于该 γ 对应的 P 。由图上看,其数值将在 $P(\gamma)$ 线下面。即 $P(\gamma)$ 线与 γ 轴围成的闭区间的点群,概括了该两源对确定的 α 、 β 下一切可能的输出功率。每一个 γ 值可能的输出功率在图3上的分布是一条 $P(\gamma)$ 曲线与 γ 轴间的垂直线段。

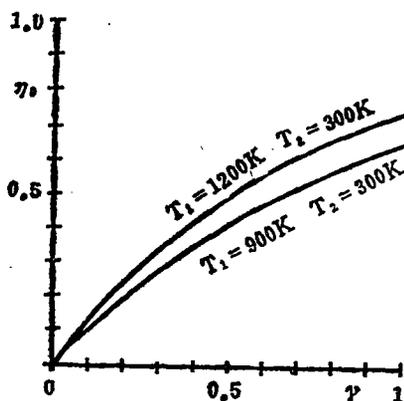


图 1

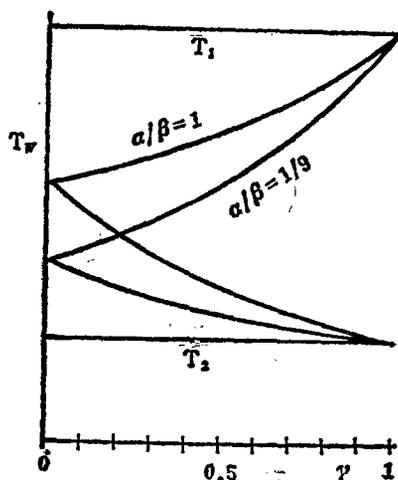


图 2

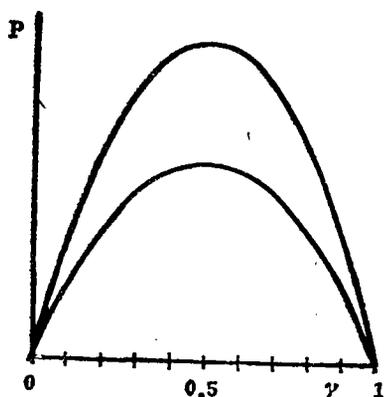


图 3

吸、放热温度，与式(4)同理

$$\eta_0 = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_{W2n}}{T_{W1n}} = 1 - \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^\gamma \quad (16)$$

并且 $Q_1 = \alpha(T_1 - T_{W1n})t_1$

$$Q_2 = \beta(T_{W2n} - T_2)t_2 \quad (17)$$

当取 $\tau = 1$ 时 [5]

$$P' = \frac{Q_1 - Q_2}{t_1 + t_2} \quad (18)$$

由式(16) ~ (18) 可得

$$P' = \frac{\alpha\beta\eta_0}{\frac{\beta}{T_1 - T_{W1n}} + \frac{\alpha}{T_{W1n} - T_1 T_2^{1-\gamma}}} \quad (19)$$

由式(19) 及 (5) 可得

$$\frac{P'}{P} = \frac{(\sqrt{\alpha} + \sqrt{\beta})^2}{T_1 - T_1 T_2^{1-\gamma}} \left[\frac{(T_1 - T_{W1n})(T_{W1n} - T_1 T_2^{1-\gamma})}{\alpha(T_1 - T_{W1n}) + \beta(T_{W1n} - T_1 T_2^{1-\gamma})} \right] \quad (20)$$

由 $\frac{T_{W2n}}{T_{W1n}} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^\gamma$ 可知，满足 $\eta_0 = 1 - \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^\gamma$ 的一对最低的工质吸、放热温度为

$$\left. \begin{aligned} T_{W2n(m;n)} &= T_2 \\ T_{W1n(m;n)} &= T_1 T_2^{(1-\gamma)} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

而一对最大工质吸、放热温度为

$$\left. \begin{aligned} T_{W1n(max)} &= T_1 \\ T_{W2n(max)} &= T_1 T_2^{1-\gamma} \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

为简化式(20)的函数关系，令

$$\theta = T_{W1n} - T_1 T_2^{1-\gamma} \quad (23)$$

只要 $(1-\gamma)$ 为有限值，以上结论完全适用于克氏微循环 [4,5]。

三 两恒温热源间的内可逆卡诺循环的“全息”热效率—功率谱

两恒温热源间的一切内可逆卡诺循环均可由 γ 值聚类。在与节二相同的条件下，对每一 γ 值可能的情况均在上文提到的垂直线段上； P' 对 $P(\gamma)$ 的偏离程度取决于工质吸、放热温度对式(6)、(7)所确定温度的偏离程度。用 T_{W1n} 、 T_{W2n} 表示 P' 对应的工质

即 $\theta = T_{W1n} - T_{W1n(m;n)}$ ，显然

$$\theta_{max} = T_1 - T_1^\gamma T_2^{1-\gamma} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \theta_{max} - \theta &= [T_1 - T_1^\gamma T_2^{1-\gamma}] - [T_{W1n} - T_1^\gamma T_2^{1-\gamma}] \\ &= T_1 - T_{W1n} \end{aligned} \quad (25)$$

$$\text{又令} \quad \frac{P'}{P_0} = \pi \quad (26)$$

称为功率弱化系数。将式(23) - (26)代入式(20)得

$$\pi = (1 + \delta)^2 \frac{\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{max}}\right) \frac{\theta}{\theta_{max}}}{\delta^2 \left(1 - \frac{\theta}{\theta_{max}}\right) + \frac{\theta}{\theta_{max}}} \quad (27)$$

可见，当传热系数一定时， π 只与 $\frac{\theta}{\theta_{max}}$ 有关。

$$\text{令} \quad \Theta = \frac{\theta}{\theta_{max}} \quad (28)$$

称为 π 函数因子。当 $\theta = \theta_{max}$ 时， $\Theta = 1$ ；当 $T_{W1n} = T_{W1n(m;n)}$ 时， $\theta = 0$ ， $\Theta = 0$ ； $0 \leq \Theta \leq 1$ 。同 γ （即 η_0 同）的诸卡诺循环又可以 Θ 值相区别。式(28)可简写为

$$\pi = (1 + \delta)^2 \frac{(1 - \Theta)\Theta}{\delta^2(1 - \Theta) + \Theta} \quad (28a)$$

$\Theta = 0$ 和 $\Theta = 1$ 时， $\pi = 0$ ，即 $P' = 0$ ，它们分别相当于式(21)与(22)的情况；由 $\frac{\partial \pi}{\partial \Theta} = 0$ 可求得

$$\Theta_a = \frac{\theta_a}{\theta_{max}} = \frac{\delta}{1 + \delta} \quad (29)$$

此时 π 及 P' 有极大值，分别为1及 $P(\gamma)$ 。由充要条件式(6)可求得同样的结果。

$$\frac{\partial \pi}{\partial \Theta} = (1 + \delta)^2 \left\{ \frac{1 - 2\Theta}{\delta^2(1 - \Theta) + \Theta} + \frac{(\delta^2 - 1)(1 - \Theta)\Theta}{[\delta^2(1 - \Theta) + \Theta]^2} \right\} \quad (30)$$

由式(30)不难看出

$$\frac{\partial^2 \pi}{\partial \Theta^2} < 0 \quad (31)$$

由以上分析得到了在上节所述条件下，当 γ 一定时（即 η_0 一定）的内可逆卡诺机的功率谱— $\pi P(\gamma)$ 。在该条件下， $P(\gamma)$ 是定值，故其谱值仅取决于 Θ 。该谱分析结果及其相应工质工作温度的对应关系见图4、5。它们是在给定 T_1 、 T_2 、 α 、 β 及 γ 值条件下由微机绘得的。其中图4既代表 $P'_i \sim \Theta$ ，也代表了 $\pi \sim \Theta$ 。显然图4中 $P'_i(\Theta)$ 曲线是上文提到的 $P(\gamma)$ 与 γ 轴间垂直线段按 Θ 展开的功率谱线。

可见，由 η_0 - P 谱再加上 π 函数式(28a)便可以概括两热源间一切可能的内可逆卡诺

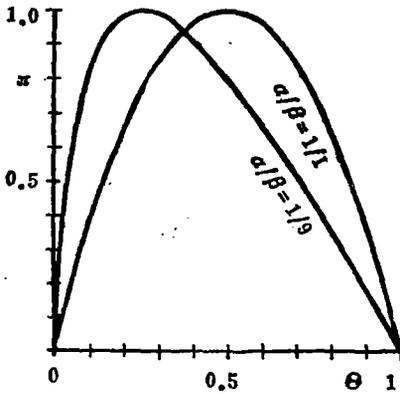


图 4

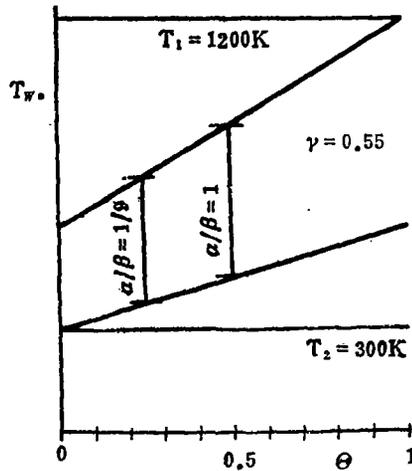


图 5

循环，称之为两源间内可逆卡诺循环的“全息”热效率—功率谱。

只要(1-γ)为有限值，该全息谱完全适用于克氏微循环。借助克氏微循环，全息谱可以概括任意热源间的内可逆热机循环。

四 “全息”谱理论初探

1、 确定两源间内可逆卡诺循环需要如下六个参数： T_1 、 $\frac{T_2}{T_1}$ 、 α 、 α/β 、 γ 、 θ 。

其中， T_1 、 T_2 被视为取决于客观条件， α 、 β 由传热学确定。因此，有限时间热力学分析的特征参数是 γ 与 θ 。当热源条件和传热速率一定时，内可逆卡诺循环由 γ 与 θ 唯一地确定。

克氏微循环亦同。

2、 对于任意热源条件，当(1-γ)为有限值时，整个内可逆循环的总输出功率 $P_{总}$ 及热效率 $\eta_{0总}$ ，与克氏微循环的 P' 及 η_0 之间的关系为

$$P_{总} = \int_F P' dF \tag{32}$$

$$\eta_{0总} = \frac{\int_F P' dF}{\int_F \frac{P'}{\eta_0} dF} \tag{33}$$

式中 dF 是克氏微循环工质由热源吸热的面积。

在具体分析时，可采用有限单元法，用有限元循环代替克氏微循环。这时，

$$P_{总} = \sum_1^n P'_i \Delta F_i \tag{34}$$

$$\eta_{0总} = \frac{\sum_1^n P'_i \Delta F_i}{\sum_1^n \frac{P'_i}{\eta_{0i}} \Delta F_i} \quad (35)$$

实际动力装置工质吸热与放热不是通过同一个 F ，且其数值也不相等，此时采用文献[5]的办法，仍可用(32) — (35)式。

3、本文只考虑了工质与热源间的传热对输出功率及热效率的影响。涉及到实际热机循环，不可避免要遇到其它不可逆因素。在没有找到更好的办法前，仍可用传统的办法对上述的结果乘上相应的效率 η_i ，例如对有限元循环 i ：

$$\eta_i = \eta_{0i} \prod_1^n \eta_i \quad (36)$$

$$P''_i = P'_i \prod_1^n \eta_i \quad (37)$$

五 “全息”谱工程分析简例

在没有取得具体工程成果之前，已有的工程实例能提供一定程度的旁证，以说明上述理论的正确性及实用的可行性。考查二次大战前至七十年代美、英、苏等国几十种驱逐舰与护卫舰一级的典型舰用蒸汽动力装置的发展情况，除个别装置的个别元循环，其 γ 值都比0.5小，有的则小得较多； Θ 值均低向偏离 Θ_0 。对动力装置，舰用的要求是装置比重（公斤/马力）要小，损耗（公斤/马力小时）要低，也就是 P' 要大 η_0 要高。那么，针对二次大战以来的情况，有限时间热力学提供的最佳标准应该是 $\gamma = 0.5, \Theta = \Theta_0$ 。由可查得的资料按此标准计算，新汽温度高达700~800℃， T_{w2} 则超过100℃许多。由于金属性能及战术技术要求的约束，新汽参数不可能那样高，那么相应的 T_{w2} 也应比上述计算值低些，但按有限时间热力学分析，应尽可能使 $\gamma \rightarrow 0.5, \Theta \rightarrow \Theta_0$ 。实际工程的发展趋势恰恰是这样。在没有进行过有限时间热力学分析，在军事技术相互保密的情况下，美苏等各国都有相同的经验：正如有的资料的总结，战后冷凝器背压提高是个趋势[6]。实际上，按有限时间热力学分析，正确的结论应该是：尽可能提高蒸汽初参数，并相应地提高冷凝器的压力。表1选录了美、苏六种装置的数据，可作为旁证。

表中②、③与①相比以及⑤、⑥与④相比，都朝着期望的要求有了大幅度的进步。涉及到有限时间热力学的因素主要有三个：1、 γ 值趋近0.5，例如，据估算，对于含新蒸汽的有限元循环大约由0.4提高到0.49(③)，对于包括蒸发受热面的子循环，大约由0.266(①)提高到0.3(③)、由0.238(④)提高到0.281(⑤)或0.27(⑥)；2、 Θ 值均由低于 Θ_0 的一边向 Θ_0 不同程度的靠近了，特别是包含过热度较大的过热蒸汽的有限元循环尤为突出；3、 γ 值接近0.5， Θ 偏离 Θ_0 较小的元循环在总循环中所占比重增大，由式(34)与(35)看，这一因素的作用是相当大的。有限时间热力学的“全息”热效率谱分析结论不但被几十年舰用蒸汽动力装置的建造经验所证实，同时也纠正了经验的片面

表1 美、苏六种舰用蒸汽动力装置

序号	国别	年代	舰名或 机型	全速工况(绝对)		装置比重 kg/kw (公斤/马力)	燃 耗 kg/kw.h (公斤/马力 小时)
				蒸汽初参数 C/MPa(C/ata)	冷凝器压力 MPa(ata)		
①	美	1943	Sumner	455/4.26 (455/42.5)	0.008 (0.08)	20.41 (15.7)	0.387 (0.285)
②	美	1950	Timmer- man	562/5.78 (562/57.2)	0.017 (0.169)	11.43 (8.4)	
③	美	1959	Coontz	520/8.31 (520/82.5)	0.0172 (0.17)	13.95 (10.25)	
④	苏	1940	7号	340/2.23 (340/22)	0.008 (0.08)	19.73 (14.5)	0.579 (0.426)
⑤	苏	五十年代	TB-8	430/5.47 (436/54)	0.013 (0.13)	13.04 (9.59)	0.557 (0.41)
⑥	苏	六十年代	TB-12	460/5.07 (460/50)	0.017 (0.165)	12.31 (9.03)	0.581 (0.327)

性。分析表明,单提冷凝器压力提高对舰用蒸汽动力装置是个趋势这是不贴切的,笔者也找到了工程实例:苏联五十年代中期生产的TB-9,新汽参数340/24,冷凝器压力0.095,与七号机组相比,初温相同而背压提高了,结果装置比重降低了10.3%而燃耗提高了18%,如果不是初压略有提高,而单纯提高背压,显然装置比重降低的幅度要减小,而燃耗增加的幅度将增大。

六 结 束 语

对于动力装置的论证、设计以及各工况合理运行参数的选择,进行有限时间热力学分析是必要的、可行的。热效率——功率谱是这一分析的有效工具。新概念 γ 与 Θ 或 π 对循环的特征给予了简明的量的表示。特别是,它们能对不同热源条件和传热速率情况提供一种共同的比较标准,以衡量其热效率和输出功率的潜力。有关以蒸汽动力装置为代表的热源间定常态能量转换热机的有限时间热力学分析原理和评估方法,作者将进一步予以研讨,以期依据热动力学的设计方法,即按着热力过程的内在规律来进行设计和评估。

参 考 文 献

- [1] Curzon, F.L, Ahlborn, B, Efficiency of a Carnot Engine at Maximum Power Output, *Am.J. phys.*43,1 (1975).
- [2] 严子浚: 卡诺循环的最佳效率与功率间的关系, 《工程热物理学报》, 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质工作温度合理性的有限时间热力学分析, 工程热物理学会第五届年会论文, 851060 (1985)
- [5] 孙丰瑞、赖锡棉: 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, 1988年
- [6] 张俊迈 《舰用汽轮机原理与设计基础》, 海军工程学院, 1982年.

The Thermal Efficiency-Output Power “Holographic” Spectrum of the Heat Engine Working between Heat Sources

Sun Fengrui Lai Ximian

(Naval Academy of Engineering)

Abstract

This paper defines the output power weakening coefficient π and π function factor Θ , establishes a thermal efficiency-output power “holographic” spectrum for a reversible cycle between two heat sources. With the aid of Clausius micro cycle or finite element cycle concept, the holographic spectrum can summarize all possible heat engine cycles between any arbitrary sources and be used to make an analysis of thermodynamics in finite time on the reasonableness of the working parameters of the heat engines cycles between heat sources.

Key words: modern, thermodynamics, Carnot cycle, heat engine, reversible cycle

新技术新产品信息

№ R88—6 余热锅炉设计 余热锅炉是回收余热系统的主要设备之一。在生产过程中排放的高温烟气经本设备进行热交换, 可产生250~460℃的过饱和和饱和蒸汽。已为哈尔滨、吉林、吉林前郭、天津、河北沧州、山东齐鲁、上海高桥等炼

油厂和大连陶瓷厂、河北易县水泥厂设计了多台余热锅炉。参数分别为588.4kPa (6kgf/cm²)、1274.8kPa (13kgf/cm²) 和3824.6kPa (39kgf/cm²); 产汽量为1-14吨/时。节煤5万多吨。减少污染, 改善环境。服务方式: 设计和咨询服务。

(如需要以上技术请与编辑部联系)