

热 气 机

652335

(美) G·沃 克

STIRLING
ENGINES

机械工业出版社

658855

TK14/03

热 气 机

〔英〕 G. 沃克 著

上海中华热气机技术开发公司 朱炜青 钱国柱 等译

韩如铎 校



机械工业出版社

译者说明

热气机又名斯特林机[⊖]，是一种外燃闭式回热循环发动机，它具有高效率，低噪声，低污染以及多能源适应性等特点，由于世界石油资源日趋短缺，对环境保护的要求日益强烈，各国都十分重视对热气机的开发研究。如日本制定了开发节能新技术的“月光计划”，确定从1982年开始，六年内投资100亿日元开发通用热气机。热气机正在向实用化发展。

本书作者沃克教授长期从事热气机和斯特林循环制冷机的研究工作，具有丰富的理论知识和实践经验，在这个领域，他是当代国际上有名望的权威之一。1982年5月曾应邀来我国讲学，并在他的倡议下，于1984年6月在上海举行了第二届国际热气机会议。

我国对热气机的开发研究还处于初期阶段。1981年12月在上海科学院主持下对我所研制的R45Ⅱ型热气机进行了技术鉴定。1982年3月由英国机械工程师学会组织，在里丁大学召开了“热气机向实用化发展”的学术讨论会，本书译者之一，朱炜青同志参加了那次会议，后来就改称为第一届国际热气机会议。现在我国就有不少大学开设的特种发动机选修课程以热气机作为重点。我们希望本书的翻译出版能有助于我国读者对这门新技术的了解，但限于译校者的水平，错误和缺点在所难免，欢迎批评指正。

本书由上海中华热气机技术开发公司[⊙]组织翻译，参加翻译和校对的有：朱炜青、韩如铎、赵华祚、李敬先、袁汇海、钱国柱、夏宗麟、周增新、李予新、阎珽、李明仁、梅先焘、汤益民、沈齐娥、孙佩玉和孙美珍等，全书由韩如铎和朱炜青负责统校。

⊖ 鉴于我国对发动机习惯根据燃料特点(如柴油机、汽油机)或工质特点(如蒸汽机、燃气轮机)来简称，而不以发明者命名，故本书将作原动机用的“斯特林机”简称“热气机”。虽然从原理上看，热气机的工质并不限于气体。当泛指按闭式回热斯特林循环工作的热机，或用作热泵、制冷机时，仍译为斯特林循环机或简称斯特林机。

⊙ 为了推动我国热气机的研究工作向实用化方向发展，1985年以上海船用柴油机研究所特种发动机研究室为基础组建了上海中华热气机技术开发公司(CHINA STIRLING TECHNOLOGY CORPORATION OF SHANGHAI, P. O. BOX 3051, SHANGHAI)。

前 言

自从完成早期的拙著《斯特林循环机》以来已经好几年了。在此期间，发生了不少新情况。因此总想编写一本内容更丰富一些的新书，而不是对旧书进行简单的修订或再版。以前那本书是作者在英国巴斯大学 (University of Bath) 渡假时，为应付一天的学术讨论会，根据一些笔记拼凑而成的，当时身边没有什么文献可供参考。幸喜那本薄薄的小册子受到了意外的赏识，翻印了好几次，并被译成俄文。

这次是在卡尔加里大学 (University of Calgary) 写的，时间比较充裕，并能充分利用手头的资料。不仅如此，而且还获得一笔艾萨克·吉兰纪念研究员奖金 (Isaac Killam Memorial Fellowship)。在编写此书期间，学校当局还解脱了我的教学和行政职务，这使我非常感激。我想为写好这本书是值得暂停一下日常工作的，不过这副担子自然要由机械系中的诸位同事们挑起了。

本书第十章自由活塞热气机由自由活塞热气机的奠基人，威廉·比尔 (William Beale) 执笔。第十九章模型热气机的撰写人是安德鲁·罗斯 (Andrew Ross)，他在模型热气机联谊会中是后起之秀。同这些专家们合作，我感到格外荣幸，并愿明确声明：以上内容所获得的赞誉应完全属于他们。(下略)

1978年9月写于卡尔加里大学 G. 沃克

目 录

译者说明

前言

第一章	理想热力循环	1
第二章	实际回热循环	20
第三章	热气机的理论分析	23
第四章	热气机的初步设计	41
第五章	热气机的结构布置	60
第六章	热气机的换热器	70
第七章	热气机的工质	92
第八章	热气机的工作特性	118
第九章	热气机的控制系统	138
第十章	自由活塞热气机	151
第十一章	菲利浦公司的热气机	172
第十二章	通用汽车公司的热气机	196
第十三章	曼恩-默哈姆热气机	211
第十四章	联合热气机公司的热气机	219
第十五章	车用热气机	236
第十六章	人工心脏用热气机	244
第十七章	水下和空间动力系统用的热气机	264
第十八章	热泵、固定动力和总能系统的斯特林机	275
第十九章	模型热气机	285
英汉对照术语和定义		291
文献目录和参考资料		296
热气机研究单位人名地址索引		336

第一章 理想热力循环

一些基本观点

热力学第一定律和第二定律适用于包括斯特林循环机在内的所有热机。遗憾的是，还不能用简单而又正确方式来描述这两个定律。当然，人类并没有遇到过违反这两条基本定律的机器，尽管许多发明家颇有“雄心壮志”，但他们关于永动机方面的建议常常是违反第一或第二定律的。

对于热力学定律，我们相信它，就能解释一切；怀疑它，就会陷于迷惑不解之中。只有理解和相信热力学定律才能正确评价回热式热机的可取之处。

热力学第一定律

第一定律是能量守恒定律。它否定存在这种发动机的可能性，即发动机象某种热力学的“魔术箱”，不需要补充能就可从中连续不断地取出功或能。第一定律要求供给机器的能量（不论何种形式）至少要等于由机器中取出的能量。我们可以考察一下把空气和汽油供给汽油机的情况。首先它们在燃烧中化合，热的燃气驱动发动机。燃料所提供的能量约有三分之一变成发动机输出的有用功，三分之一散入冷却系统，剩下的三分之一作为低品位的热能由排气带走。如果停止供油，发动机随即停车。这是直接应用热力学第一定律的实例，也是人们的常识。

热力学第二定律

热力学第二定律可能较难理解。对该定律的一种说法是：不可能建立这样的一个循环系统，该系统从热源吸取热量，并对外界做等量的功。第一定律说明产生的功永远不会大于供给的热，而第二定律则进一步指出产生的功必须小于供给的热。在汽油机中，正是第二定律否定了把汽油中的能全部转换成有用功的可能性。一部分能量必定以热的形式抛弃到冷却系统或排气中。

以上的简要叙述已足够满足本书的需要。有关热力学第一定律和第二定律的进一步讨论和引伸，读者可参考任何一本标准的工程热力学教科书，例如华莱士和林宁所著的“工程热力学基础”[⊖]。

热效率

产生的功 W 与供给的能量 Q 之比称为热效率 η ，即 $\eta = W/Q$ 。在很多应用中，重要的是使热效率增加到最大限度，因为它代表所消耗的若干加仑汽油或其他油料能量中的有用部分。所以人们感兴趣的是取得最大可能的热效率值，但要牢记，由于热力学第二定律的限制，此值恒小于1。

卡诺效率

在任何给定的条件下，理论的最高热效率只取决于循环的最高和最低温度，并用下式表示

$$\eta_{\max} = (T_{\max} - T_{\min})/T_{\max}$$

[⊖] Wallace, F. J. and Linning, W. A. (1963). Basic engineering thermodynamics. Sir Isaac Pitman and Son Ltd, London.

此关系式非常重要，因此特别命名为“卡诺效率”。这是可能达到的最大值，获得该值的条件是：系统的全部吸热和释热分别在最高和最低温度下等温进行。

p - V 图和 T - S 图

即使是最简单的热机，它的工作过程亦极复杂，以致对发生的情况无法作精确计算。因而提出一个理论的模型，在该模型中对各种过程所作的理想化程度应以能够对其进行分析为限度。于是，各种机器的工作都可以用重复出现的一组热力过程，即一个循环来加以模拟。通常，对每个过程所做的假设是，当流体从一种状态变到另一种状态时，它的热力参数发生变化，但其中有一个参数保持恒定。重要的参数有压力（ p ）、容积（ V ）、温度（ T ）、内能（ U ）、热焓（ W ）和熵（ S ）。

一个循环是由一组过程组成的，每个过程都有一个热力参数在其他参数发生变化时保持恒定。这样的循环可用各种形式的线图来表示。其中压容图（ p - V ）和温熵图（ T - S ）对帮助分析热机的工作最为重要。

这两种线图之所以重要，是在于 p - V 图的面积代表所作的功，而 T - S 图的面积则代表换热量。图1-1中给出一个顶端封闭的气缸中的活塞。一定量的气体密封在活塞顶上的气缸容积中，设其状态处于 p - V 图和 T - S 图中的 A 点。如果现在通过气缸壁由外部热源对气体加热，就可能发生许多不同的情况。如果活塞固定不动，则容积保持不变，对气体加热的结果导致压力和温度升高，如图1-1 a所示。加入的热量等于 T - S 图中的阴影面积。所作的任何功都等于 p - V 图面积，因容积不变，所以没有做功。另一种情况是，设活塞可以自由地运动，并调节加热过程，使压力或温度保持恒定，得到的 p - V 图和 T - S 图示于图1-1 b和1-1 c。在这两种情况中，当热量加入系统时，都因气体膨胀到较大容积而做功。

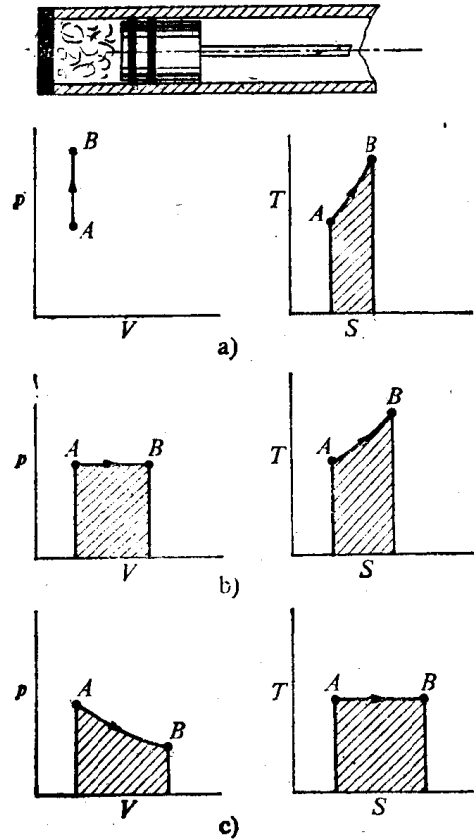


图1-1 p - V 图与 T - S 图上的热力过程
a) 等容加热 b) 等压加热 c) 等温加热

卡 诺 循 环

卡诺循环是由四个相继发生的过程所组成的热力循环，如图1-2所示。

在讨论理想的卡诺循环发动机时，假设气缸和活塞如图1-2所示。气缸被完全绝热，活塞运动时与气缸之间无摩擦和无工质泄漏，而气缸盖能根据需要做到完全导热或完全绝热。

循环开始时，假设活塞处于外止点位置，气缸与活塞所包容的容积达最大值。工质的温度（ T_{min} ）和压力处于最小值，用图1-2 a中的点1表示。令活塞向气缸盖方向运动进行压

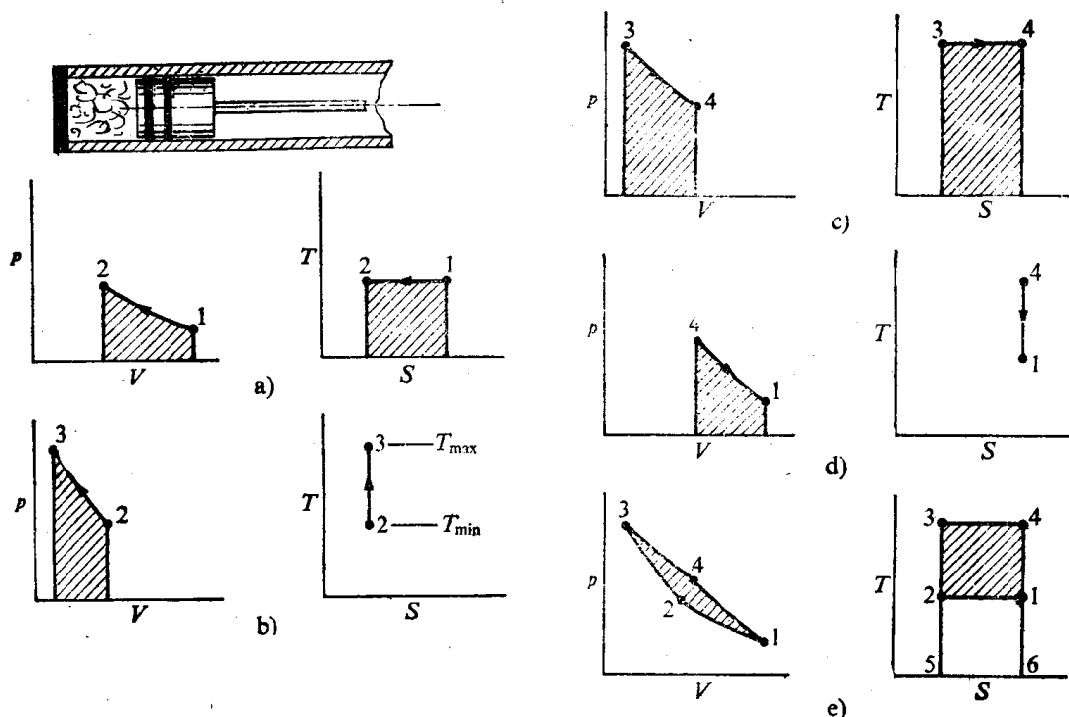


图1-2 卡诺循环

a) 等温压缩 b) 等熵压缩 c) 等温膨胀 d) 等熵膨胀 e) 完整的卡诺循环组成图

缩，用图 1-2 a 中的过程 1-2 表示。在该过程中设气缸盖具有完全的导热性，即导热率为无限大，因而过程按等温进行（温度不变）。 $P-V$ 图中的阴影面积代表对气体作的功， $T-S$ 图中的阴影面积代表从工质吸出的热量。在这种情况下，由于过程是等温的，故吸出的热量恰好等于对气体所作的功。

第二个过程是绝热压缩过程，示于图 1-2 b。使气缸盖完全绝热，当活塞继续向气缸盖方向运动时不能再从工质吸热，因而熵保持不变。这个过程导致容积减小而压力和温度都升高。对气体所作的功为 $P-V$ 图阴影面积，但没有热量传递。剩下的两个相继进行的过程是 3-4 的等温膨胀和 4-1 的绝热膨胀，分别示于图 1-2 c 和 1-2 d。

四个过程组成的 $P-V$ 图和 $T-S$ 图示于图 1-2 e。 $P-V$ 图上 1-2-3-4-1 所包容的阴影面积为循环所作的功。同样， $T-S$ 图上的面积 3-4-6-5-3 代表供给循环的热量。面积 1-2-3-4-1 是转换成功的热量，面积 1-2-5-6-1 是循环放出的废热。从该图可明显地看出卡诺循环之所以能够达到最高的热效率，是因为在给定的温度界限 T_{max} 和 T_{min} 下，不可能有另外的一组热力过程能够使面积 1-2-3-4-1 与 3-4-6-5-3 的比值超过卡诺循环。因此，效率 $\eta = W/Q = \text{面积 } 1-2-3-4-1 / \text{面积 } 3-4-6-5-3$ 必然最大。

在热力分析中必须使用绝对温度，所以 $T-S$ 图上的零度是 -273°C ($=0\text{K}$) 或 -460°F ($=0^\circ\text{R}$)，因而废热面积 1-2-5-6-1 可能是相当可观的。

显然，卡诺循环的效率（对任何发动机也是如此）可以通过 (a) 提高 T_{max} 和 (b) 降低 T_{min} 来加以改善。 T_{max} 的最大极限值受发动机材料限制，被称之为“冶金极限”。 T_{min} 的最小可能值是所用的冷却水或冷却空气温度，通常为环境大气温度。

实际上不可能建造卡诺循环发动机。因能满足理想绝热或导热要求的材料是不存在的，任何活塞在气缸中滑动都会产生摩擦和泄漏损失。而最大的困难是气体（例如空气）的等温

和绝热过程在 $P-V$ 图上斜率的差别很小，因此图 1-2e 中显示的 $P-V$ 图面积小到可以忽略的程度，除非采用极高的压力和极长的活塞冲程。这将使发动机变得极其笨重，而它还完全不能产生足够的功去克服自身的摩擦损失。尽管缺乏实用价值，但在初步研究发动机的工作时，卡诺循环还是有用的。而且在经过某些更改（例如变成朗肯循环后），卡诺循环可以代表如往复式蒸气机、蒸气透平或氟利昂制冷装置等液气机械的工作模型。

斯特林循环

斯特林循环在某些方面与卡诺循环相似，示于图 1-3。

一个装有两个对置活塞的气缸，在两个活塞之间设置一个回热器。可以把回热器设想成一块交替地释热和吸热的热力海绵。它是一个用金属丝或金属带细分的多孔基体。回热器与活塞之间形成了两个空间，一个称为膨胀腔，使它保持高温 T_{max} 。另一个称为压缩腔，使它保持低温 T_{min} 。因此，在回热器两端有一个温度梯度 ($T_{max} - T_{min}$) 并假设回热器在纵向没有热传导，与卡诺循环的情况一样，还假设活塞在运动中无摩擦，工质在气缸中无泄漏损失。

循环开始时，设压缩腔活塞处于外止点，膨胀腔活塞处于内止点并紧靠回热器端面。这样，全部工质都处于冷的压缩腔内。因这时的容积为最大值，所以工质的压力和温度都处于最小值，用 $P-V$ 图和 $T-S$ 图上的点 1 表示。示于 1-3。在压缩过程 1-2，压缩腔活塞向内止点运动，膨胀腔活塞保持不动，工质在压缩腔被压缩，压力增加。因热量 Q_c 已通过压缩腔气缸壁排放到环境中，故工质温度保持不变。

在回热过程 2-3 中，两个活塞同时运动，压缩活塞继续向回热器运动，而膨胀活塞远离回热器，因此两活塞间的容积保持不变。工质通过回热器的多孔金属基体从压缩腔转移到膨胀腔。当工质通过回热器时，被回热器基体中的热量加热，温度从 T_{min} 上升到 T_{max} 后流入膨胀腔。由于工质通过回热器基体时是在等容条件下被逐步提高温度的，结果使压力增加。

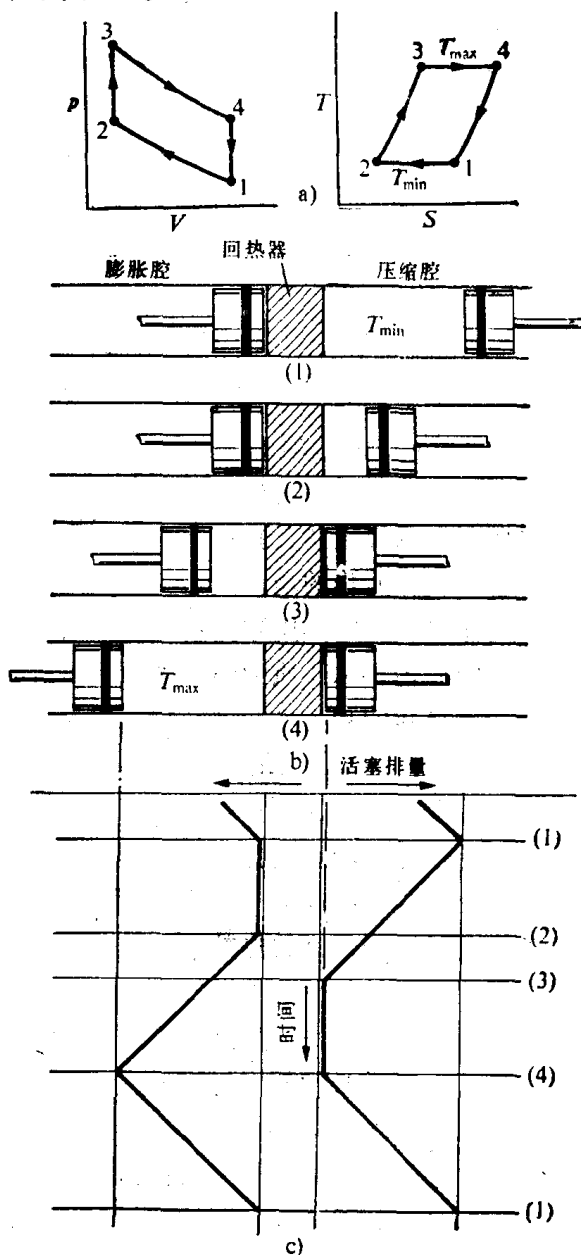


图1-3 斯特林循环
a) $P-V$ 图和 $T-S$ 图 b) 在循环各端点的活塞位置
c) 时间-排量图

在膨胀过程 3-4 中，膨胀腔活塞继续朝背离回热器的方向向外止点运动，压缩腔活塞则停留在内止点并紧靠回热器。在膨胀过程中，容积增大压力降低。由于从外热源向系统加入热量 Q_E ，工质温度保持不变。

循环的最后一个过程 4-1 也是回热过程，在此期间两活塞同时运动（保持容积不变），使工质从膨胀腔通过回热器返回压缩腔。在通过回热器基体时，热量从工质传给回热器基体，工质温度降低到 T_{min} 并流入压缩腔。工质在过程中释出的热量将保存在回热器基体内，直到下一个循环的 2-3 过程再传递给工质。

因此，斯特林循环由以下四个换热过程组成。

过程 1-2：等温压缩，热量在 T_{min} 温度下从工质传给外部低温热源。

过程 2-3：等容过程，热量从回热器的基体传给工质。

过程 3-4：等温膨胀，热量在 T_{max} 温度下从外部热源传给工质。

过程 4-1：等容过程，热量从工质传给回热器基体。

如果在过程 2-3 中的传热量与过程 4-1 中的相等，则发动机与其环境之间发生的热交换仅仅是 (a) 在 T_{max} 温度下供热和 (b) 在 T_{min} 温度下释热。供热和释热都是在等温条件下进行的，因而满足了热力学第二定律对最高热效率的要求，所以斯特林循环的热效率与卡诺循环的相同，即 $\eta = (T_{max} - T_{min})/T_{max}$ 。斯特林循环胜过了卡诺循环的主要优点是用两个等容过程代替两个绝热过程，这就大大的增加了 $p-V$ 图的面积。因此，为了取得适当的功，它不需要象卡诺循环那样必须借助于很大的压力和扫气容积。

在给定的压力、温度和容积界限下，卡诺循环和斯特林循环 $p-V$ 图的比较示于图 1-4。

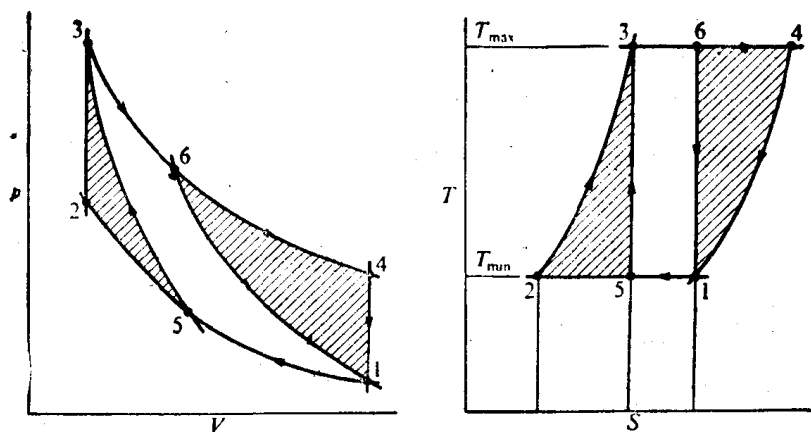


图1-4 斯特林循环和卡诺循环。把斯特林循环和卡诺循环重叠，它们具有相同的最大和最小温度、压力和容积值。在 $p-V$ 图上的阴影部分代表斯特林循环增加的功。在 $T-S$ 图上的阴影部分代表斯特林循环增加的换热量

阴影面积 5-2-3-5 和 1-6-4-1 代表用等容过程代替绝热过程多做的功。卡诺循环的等温过程 1-5 和 3-6 被分别延伸到斯特林循环的 1-2 和 3-4，因此，供给斯特林循环的热量和从循环系统排出的热量都按有用功增加的比例增加。输入热量转换成功的比例（即热效率）对两种循环都是相同的。

埃里克森循环

埃里克森循环用等压回热过程代替斯特林循环中的等容回热过程，形成如图 1-5 所示的 $P-V$ 图和 $T-S$ 图。其效率与卡诺循环相同。同斯特林循环一样，埃里克森循环的传热量和有用功在给定的压力、容积和温度界限下也比卡诺循环大得多。

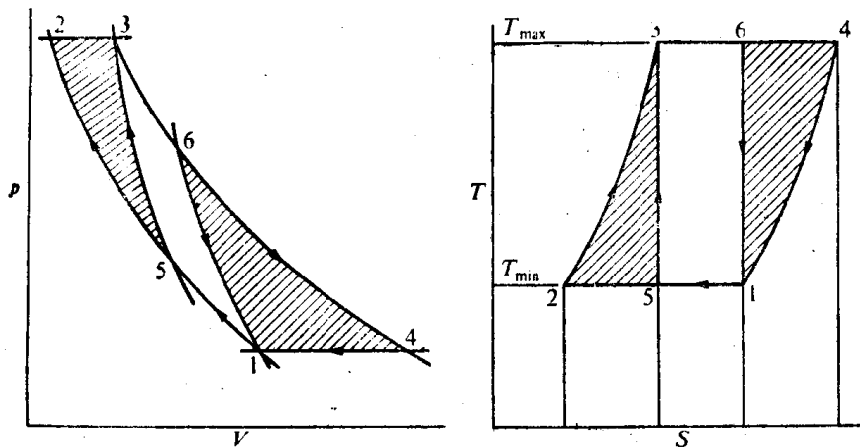


图1-5 埃里克森循环和卡诺循环。把埃里克森循环和卡诺循环重叠，它们具有相同的最大和最小温度、压力和容积值。阴影部分代表埃里克森循环增加的输出功和换热量

斯特林循环用于原动机

在以上的讨论中，在某一高温 T_{max} 下对循环供热，其中部分热量转变成功，其余部分在低温 T_{min} 下以热的形式被排掉。这就是对作为原动机工作循环的描述。所谓原动机就是把高温热源供给的热转换成功并在低温下排热的机械。

斯特林循环用于制冷机

描述斯特林循环用于原动机时的理想热机，同样也能用来描述斯特林循环用于制冷机时的工作过程。唯一的区别是外部热源在膨胀过程中供热的温度低于压缩过程中工质的释热温度。如图1-6所示，在作为原动机工作的 $P-V$ 和 $T-S$ 图上附加了制冷机循环。

当斯特林机作为制冷机工作时，在膨胀过程 $3'-4'$ 把热量从冷区抽走。压缩功（面积 $1-2-5-6-1$ ）对原动机和制冷机都是相同的。制冷机的膨胀功（面积 $4'-3'-5-6-4'$ ）低于其压缩功，相当于面积 $1-2-3'-4'-1$ 的功需要由外源提供以驱动循环的进行。工质在过程 $2-3'$ 从压缩腔转移到膨胀腔时，其温度降低，而在反向的回热过程 $4'-1$ 中，工质温度相应地增加。

用性能系数 COP (coefficient of performance) 来评价制冷机的性能。

$$COP = \frac{\text{抽走的热}}{\text{驱动功}} = \frac{T_{cst}}{(T_{min} - T_{cst})}$$

斯特林、埃里克森以及卡诺循环的 COP 在给定的温度界限下是相同的，但在给定的压力和容积界限下斯特林循环、埃里克森循环的致冷量远大于卡诺循环。

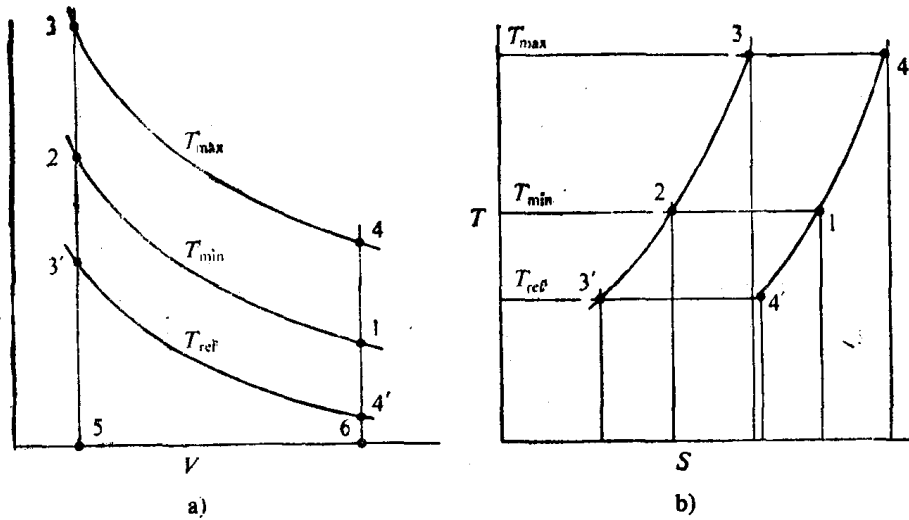


图1-6 原动机和制冷机的斯特林循环。两者都在 T_{min} 温度下压缩。原动机在高温下由外界供热以产生有用功。制冷机从外界吸入热量以致冷，并需向制冷机输入净功
 a) 作为原动机是在 T_{max} 温度下膨胀 b) 作为制冷机是在 T_{ref} 温度下膨胀

斯特林循环用于热泵

作为热泵，斯特林循环的工作过程与上述的制冷机完全相同，它的膨胀腔温度 T_{ref} 也低于压缩腔温度 T_{min} 。与制冷机不同的是热泵的 T_{ref} 和 T_{min} 都提高了。在原动机和制冷机中 T_{min} 都是环境大气温度，因此能用水冷却，而热泵的 T_{min} 是系统的放热温度，此时排出的热量是作为有用的产物来为建筑物如音乐厅或办公楼供暖的。所以热泵的 T_{min} 高于环境大气温度，供给热泵循环的热量 (T_{ref}) 取自大气或者河水，其温度接近环境大气温度。

斯特林循环用于热泵和制冷机的性能比较示于图 1-7。两者都需要外源做功来驱动循环运行，此功相当于面积 1-2-3-4-1。在热泵的情况下，有用的产物是循环在 T_{min} 温度下排出的热量。所以热泵的性能系数为：

$$COP_{hp} = \frac{\text{排出的热量}}{\text{驱动功}} = \frac{T_{min}}{(T_{min} - T_{ref})}$$

它是热效率的倒数，而制冷机的性能系数为：

$$COP_{ref} = \frac{T_{ref}}{(T_{min} - T_{ref})}$$

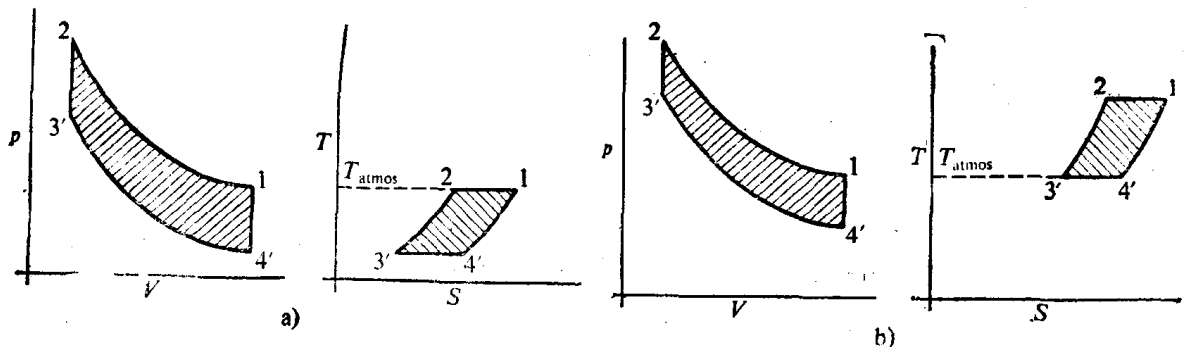


图1-7 热泵和制冷机的斯特林循环。作为热泵或制冷机工作时，膨胀过程温度低于压缩过程，需要输入功。对热泵，膨胀在大气温度下发生，而压缩在高温下进行，其排出的热量即为循环的有效输出。对制冷机，外界在低温膨胀期间供热，此即为循环的制冷量

a) 制冷机 b) 热泵

它不是热效率的倒数。

斯特林循环用于压力发生器

一种以泵送流体和增加其压力为目的，与斯特林循环密切相关的系统已被提出并正在开发中。如果把泵送的液体（或气体）用隔膜（或活塞）与斯特林循环装置中的工质隔开，该系统可属于按原动机工作的斯特林循环。另一种情况是工质本身就是被压缩和泵送的流体，这样就不可避免地要设置阀门或别的流体控制装置，那么这种装置就不能归类于斯特林循环的机械。不过，在本文中仍然把它们作为斯特林机械加以讨论。在多数情况下流体是以低压加入循环，以较高压力排出。在高温下供热，在低温下释热。膨胀功大于压缩功，其差值等于泵送压缩流体的功。

复合循环

里特林格循环

斯特林和其他回热式发动机理想热力循环的通用形式是由（a）对系统供热或释热的两个等温过程，（b）两个多变过程所组成。在理想的可逆热力循环中，必须做到仅在循环的上下温度界限上与外界发生热交换。因此，多变过程的吸热和释热必须依靠回热器的储热功能来完成。

里特林格（Reitlinger, 1876）首先分析了这种广义的循环。根据多变回热过程的不同特点，里特林格循环有无限多的形式。

应用热力学都着重介绍没有实用价值的作为理想系统的卡诺循环。现在可以看出，卡诺循环就是多变过程具有绝热等熵特点的里特林格循环。这种并不恰当的分类只不过意味着连接两个等温吸热和释热过程的是两个没有任何热交换（绝热）的熵值恒定（等熵）的过程而已。

另外两个知名的特例是斯特林循环和埃里克森循环，其回热过程分别为等容和等压过程。

可以假定出无数个热力循环，它们的回热过程既不是等容或等压，也不是等熵过程。但所有这些循环的热效率都相同，即

$$\eta = \frac{\text{供给的热量} - \text{释出的热量}}{\text{供给的热量}} = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max}}$$

拉利斯等温循环

广义里特林格循环的另一特例是由拉利斯（Rallis, 1976）[⊖]提出的。拉利斯等温循环也是一种复合循环，规定由两个等温过程和两个部分等容、部分等压的回热过程组成，如图1-8所示。

显然，斯特林循环和埃里克森循环都是拉利斯复合循环的特例，对其他一些特例也能同样加以确定。因此，最好先推导出拉利斯循环的一般解析式，然后根据特例的需要再进行简化是十分方便的。

拉利斯提出了下列的计算法：

⊖ 私人通信。

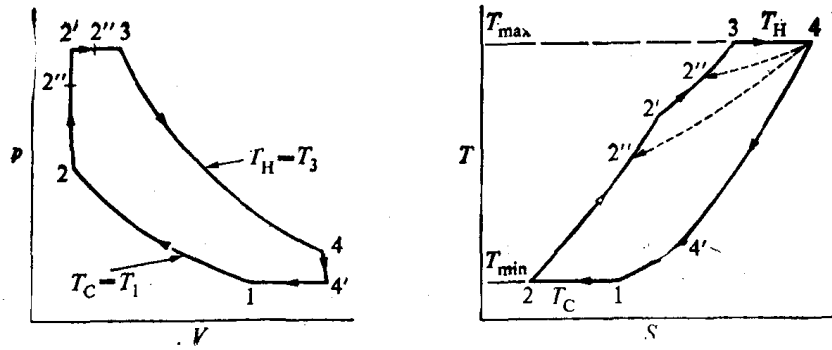


图1-8 拉利斯等温回热循环。循环中的膨胀和压缩过程为等温过程。回热过程部分为等容，部分为等压过程。如果回热过程不完全，则工质被回热加热到温度 T_2' ，并需要补充加热到温度 T_3 。

符号规定：

T_i = 工质在状态 i 的绝对温度

v_i = 工质在状态 i 的比容

p_i = 工质在状态 i 的压力

W = 每循环对外界作的比功

Q_{ext} = 每循环外界提供的比热量

R = 气体常数

c_p = 工质等压比热

c_v = 等容比热

\bar{p}_m = 平均有效压力

$\gamma = c_p/c_v$ 比热比

为了便于分析，确定下列无因次参数：

$\tau = T_3/T_1$ 温度比

$r_c = v_1/v_2$ 容积压缩比

$r_e = v_4/v_3$ 容积膨胀比

$\alpha = T_2'/T_2 = p_3/p_4$ 等容加热比

$\beta = T_3/T_2' = v_3/v_2$ 等压加热比

$\rho = T_4/T_4' = p_4/p_1$ 等容冷却比

$\sigma = T_4'/T_1 = v_4/v_1$ 等压冷却比

$\epsilon = (T_2' - T_1)/(T_3 - T_1)$ 回热器有效性

$\eta = W/Q_{\text{ext}}$ 热效率

$\xi = \bar{p}_m/p_1$ 循环比功

对等温循环，由于 $T_2 = T_1$ ， $T_4 = T_3$ 故

$$\alpha\beta = \rho\sigma = \tau \quad (1.1)$$

$$r_e = \sigma r_c / \beta = \alpha r_c / \rho \quad (1.2)$$

$$T_2' = [\epsilon(\tau - 1) + 1]T_1 \quad (1.3)$$

每循环对外作功为：

$$\begin{aligned}
W &= p_3(v_3 - v_2) + RT_3 \ln r_c - p_1(v_4 - v_1) - RT_1 \ln r_c \\
&= p_3 v_3 - p_3 v_2 + RT_3 \ln r_c - p_1 v_4 + p_1 v_1 - RT_1 \ln r_c \\
&= RT_3 - \alpha p_2 v_2 + RT_3 \ln r_c - \sigma p_1 v_1 + RT_1 - RT_1 \ln r_c \\
&= R[T_3 - \alpha T_1 + T_3 \ln r_c - \sigma T_1 + T_1 - T_1 \ln r_c] \\
&= RT_1 [\tau - \alpha + \tau \ln(ar_c/\rho) - \sigma + 1 - \ln r_c] \\
&= RT_1 [\tau \{1 + \ln(ar_c/\tau)\} - (\alpha + \sigma + \ln r_c) + 1] \quad (1.4)
\end{aligned}$$

当 $T_1 \leq T_2' \leq T_2''$ 时, 每循环外界供给热量为:

$$Q_{\text{ext}} = c_p(T_2' - T_2'') + c_p(T_3 - T_2') + RT_3 \ln r_c$$

而对 $T_2' \leq T_2'' \leq T_3$

$$Q_{\text{ext}} = c_p(T_3 - T_2'') + RT_3 \ln r_c$$

当 $T_1 \leq T_2'' \leq T_2'$

则

$$T_1 \leq [\varepsilon(\tau - 1) + 1]T_1 \leq \alpha T_1$$

或

$$1 \leq [\varepsilon(\tau - 1) + 1] \leq \alpha$$

当

$$T_2' \leq T_2'' \leq T_3$$

则

$$\alpha T_1 \leq [\varepsilon(\tau - 1) + 1] \leq T_3$$

或

$$\alpha \leq [\varepsilon(\tau - 1) + 1] \leq \tau$$

因此对 $T_1 \leq T_2'' \leq T_2'$

$$\begin{aligned}
Q_{\text{ext}} &= c_p[a - \{\varepsilon(\tau - 1) + 1\}]T_1 \\
&\quad + c_p[T_3 - \alpha T_1] + RT_3 \ln(ar_c/\rho) \\
&= RT_1 \left[\frac{a - \varepsilon(\tau - 1) - 1}{(\gamma - 1)} + \frac{\gamma(\tau - \alpha)}{(\gamma - 1)} + \tau \ln(ar_c/\rho) \right] \\
&= \frac{RT_1}{(\gamma - 1)} [\{a - 1\} - \varepsilon(\tau - 1) \\
&\quad + \gamma(\tau - \alpha) + \tau(\gamma - 1) \ln(ar_c/\rho)] \quad (1.5)
\end{aligned}$$

而当 $T_2' \leq T_2'' \leq T_3$

$$\begin{aligned}
Q_{\text{ext}} &= c_p[T_3 - \{\varepsilon(\tau - 1) + 1\}T_1] + RT_3 \ln(ar_c/\rho) \\
&= RT_1 \left[\frac{\gamma\{\tau - \varepsilon(\tau - 1) - 1\}}{(\gamma - 1)} + \tau \ln(ar_c/\rho) \right] \\
&= \frac{RT_1}{(\gamma - 1)} [\gamma(1 - \varepsilon)(\tau - 1) \\
&\quad + \tau(\gamma - 1) \ln(ar_c/\rho)] \quad (1.6)
\end{aligned}$$

$T_1 \leq T_2'' \leq T_2'$ 时的热效率为:

$$\eta = \frac{(\gamma - 1)[\tau\{1 + \ln(ar_c/\rho)\} - (\alpha + \sigma + \ln r_c) + 1]}{(\alpha - 1) - \varepsilon(\tau - 1) + \gamma(\tau - \alpha) + \tau(\gamma - 1) \ln(ar_c/\rho)} \quad (1.7)$$

而当 $T_2' \leq T_2'' \leq T_3$ 时

$$\eta = \frac{(\gamma - 1)[\tau\{1 + \ln(ar_c/\rho)\} - (\alpha + \sigma + \ln r_c) + 1]}{\gamma(1 - \varepsilon)(\tau - 1) + \tau(\gamma - 1) \ln(ar_c/\rho)} \quad (1.8)$$

每循环输出的有效功可以用平均有效压力表示, 平均有效压力定义为:

$$\bar{p}_m = W / (\text{冲程容积})$$

$$\begin{aligned}\bar{p}_n &= \frac{RT_1[\tau\{1 + \ln(ar_0/\rho)\} - (a + \sigma + \ln r_0) + 1]}{(v_4 - v_2)} \\ &= \frac{RT_1 r_0[\tau\{1 + \ln(ar_0/\rho)\} - (a + \sigma + \ln r_0) + 1]}{v_1(\sigma r_0 - 1)}\end{aligned}$$

把 \bar{p}_n 表示成状态 1 压力下的无因次参数

$$\begin{aligned}\xi &= \bar{p}_n/p_1 \\ &= \frac{r_0[\tau\{1 + \ln(ar_0/\rho)\} - (a + \sigma + \ln r_0) + 1]}{(\sigma r_0 - 1)}\end{aligned}\quad (1.9)$$

讨论下面一些特殊情况:

(a) 理想斯特林循环

此时 $\beta = \sigma = 1$

因而 $a = \rho = \tau$

$r_0 = r_c = r$

由于 $T_1 \leq T_2' \leq T_2'' (= T_3)$

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{(\gamma - 1)[\tau\{1 + \ln r\} - (\tau + 1 + \ln r) + 1]}{(\tau - 1) - \varepsilon(\tau - 1) + \tau(\gamma - 1)\ln r} \\ &= \frac{(\gamma - 1)(\tau - 1)\ln r}{(1 - \varepsilon)(\tau - 1) + \tau(\gamma - 1)\ln r}\end{aligned}\quad (1.10)$$

当 $\varepsilon = 1$, 卡诺效率 $\eta = 1 - (1/\tau)$

并且

$$\begin{aligned}\xi &= \frac{r[\tau(1 + \ln r) - (\tau + 1 + \ln r) + 1]}{(r - 1)} \\ &= \frac{r(\tau - 1)\ln r}{(r - 1)}\end{aligned}\quad (1.11)$$

(b) 理想埃里克森循环

此时 $a = \rho = 1$

因而 $\beta = \sigma = \tau$

和 $r_0 = r_c = r$

由于 $T_2' (= T_1) \leq T_2'' \leq T_3$

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{(\gamma - 1)[\tau\{1 + \ln r\} - (1 + \tau + \ln r) + 1]}{\gamma(1 - \varepsilon)(\tau - 1) + \tau(\gamma - 1)\ln r} \\ &= \frac{(\gamma - 1)(\tau - 1)\ln r}{\gamma(1 - \varepsilon)(\tau - 1) + \tau(\gamma - 1)\ln r}\end{aligned}\quad (1.12)$$

对于 $\varepsilon = 1$, 卡诺效率 $\eta = 1 - (1/\tau)$

且

$$\begin{aligned}\xi &= \frac{r[\tau\{1 + \ln r\} - (1 + \tau + \ln r) + 1]}{(\tau r - 1)} \\ &= \frac{r(\tau - 1)\ln r}{(\tau r - 1)}\end{aligned}\quad (1.13)$$

(c) 理想等容加热和等压冷却循环

此时
因而
和
由于

$$\beta = \rho = 1$$

$$a = \sigma = \tau$$

$$r_o = ar_o = \tau r_o$$

$$T_1 \leq T_2' \leq T_2' (= T_2)$$

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{(\gamma - 1)[\tau\{1 + \ln(\tau r_o)\} - (\tau + \tau + \ln r_o) + 1]}{(\tau - 1) - \varepsilon(\tau - 1) + \tau(\gamma - 1)\ln(\tau r_o)} \\ &= \frac{(\gamma - 1)[\tau\{\ln(\tau r_o) - 1\} - \{\ln r_o - 1\}]}{(1 - \varepsilon)(\tau - 1) + \tau(\gamma - 1)\ln(\tau r_o)} \\ &= \frac{(\gamma - 1)[\tau(\ln \tau + \ln r_o) - \tau - \ln r_o + 1]}{(1 - \varepsilon)(\tau - 1) + \tau(\gamma - 1)(\ln \tau + \ln r_o)} \\ &= \frac{(\gamma - 1)[\tau(\ln \tau - 1) + (\tau - 1)\ln r_o + 1]}{(1 - \varepsilon)(\tau - 1) + \tau(\gamma - 1)(\ln \tau + \ln r_o)} \end{aligned} \quad (1.14)$$

对于 $\varepsilon = 1$

$$\eta = 1 - \frac{(\tau + \ln r_o - 1)}{\tau \ln(\tau r_o)}$$

且

$$\begin{aligned} \xi &= \frac{r_o[\tau\{1 + \ln(\tau r_o)\} - (\tau + \tau + \ln r_o) + 1]}{(\tau r_o - 1)} \\ &= \frac{r_o[\tau\{\ln(\tau r_o) - 1\} - (\ln r_o - 1)]}{(\tau r_o - 1)} \end{aligned} \quad (1.15)$$

(d) 理想等压加热和等容冷却循环

此时
因而
和
由于

$$a = \sigma = 1$$

$$\beta = \rho = \tau$$

$$r_o = r_o/\tau$$

$$T_2' (= T_1) \leq T_2' \leq T_2$$

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{(\gamma - 1)[\tau\{1 + \ln(r_o/\tau)\} - (1 + 1 + \ln r_o) + 1]}{\gamma(1 - \varepsilon)(\tau - 1) + \tau(\gamma - 1)\ln(r_o/\tau)} \\ &= \frac{(\gamma - 1)[\tau\{1 + \ln(r_o/\tau)\} - (1 + \ln r_o)]}{\gamma(1 - \varepsilon)(\tau - 1) + \tau(\gamma - 1)\ln(r_o/\tau)} \end{aligned} \quad (1.16)$$

对于 $\varepsilon = 1$

$$\eta = 1 - \frac{(1 - \tau) + \ln r_o}{\tau \ln(r_o/\tau)}$$

且

$$\xi = \frac{r_o[\tau\{1 + \ln(r_o/\tau)\} - (1 + \ln r_o)]}{(r_o - 1)} \quad (1.17)$$

拉利斯绝热循环

拉利斯 (Rallis, 1976)[⊖] 还研究过另外一种循环, 他假设压缩和膨胀是绝热的 (无热交换) 而不是前面所假设的等温过程。该循环示于图 1-9。同前述一样, 所有特例都能从该循环的一般式导出。

⊖ 私人通信。