

布雷顿循环和兰金循环结合 使燃气轮机性能优化

——一种联合生产的方案

[美] 梅塞利 R·L· 斯特罗塞 J·R·

〔提要〕众所周知，布雷顿 (Brayton) 循环和兰金 (Rankine) 循环是广泛用于生产电力的循环。二种循环流体的结合是由国际动力技术公司提出的，并由艾莉森燃气轮机分部进行了试验。由排气余热产生的蒸汽在通过涡轮膨胀以前，先在燃气轮机燃烧室内与燃料和空气混合。

在不变的涡轮温度下，可使现有发动机的热效率增加40%，输出功率增加60%。这种概念叫做双工质循环 (DFC)。

艾莉森公司在501-KB发动机上的试验结果已与发动机的计算机模型进行了比较，表明二者吻合很好。本文将表明，在选择的情况下，如何利用DFC在满足电力和蒸汽要求的同时，使热效率最高。与生产电力和蒸汽的其它方案进行了比较。

主题词 燃气轮机 布雷顿循环 兰金循环

讨 论

燃气轮机动力装置满足世界上广泛范围的能量需要。其中大部分燃气轮机是简单的布雷顿循环发动机，把大量热量排放到大气。这种循环的热效率在22%—30%范围内。把布雷顿循环改变成回热或中间冷却的循环可以改进发动机的性能，但增加了系统的复杂程度。

改变布雷顿循环的另一种方法是使其与兰金循环结合，并通过增加废热锅炉回收排气的能量，用来产生蒸汽，改进系统的性能。典型的情况是联合循环或联合生产的结构（这里的联合循环是指只生产电力，而联合生产是指系统既生产电力又提供蒸汽）。

吉桂明摘译自《International Journal of Turbo & Jet-engines》1985, Vol. 2, №2, p115—122.

这种增加功率和热效率的方法是国际动力技术公司和其他一些单位提出的, 并已由艾莉森燃气轮机分部进行了试验, 它把废热锅炉产生的蒸汽喷入燃气轮机的燃烧室。二种工质在燃气轮机燃烧室内混合。在混合物通过涡轮膨胀之前, 空气和蒸汽进行混合具有双重的得益。因为涡轮的输出功率与质量流量成正比, 功率直接随加入燃烧室的蒸汽量而增加。该增加量约为采用DFC而增加的总功率的一半。增加的另一半功率是通过涡轮膨胀的气体混合物比热增加的结果。

对于典型的情况, DFC空气、燃料和蒸汽混合物的比热是1.293千焦耳/公斤·℃, 而发动机标准的燃气混合物的比热为1.122千焦耳/公斤·℃。比热增加了15%。

当考虑到DFC可组成联合生产装置和联合循环时, 则改进燃气轮机性能的方案将会进一步增多。

代表各种设计概念的燃气轮机装置的示意图示于图1。该图包括DFC、联合生产装置和联合循环, 以及这些系统的组合。涡轮和锅炉之间包含一个加热器, 以便包括其它一些方案并扩大系统性能的范围。

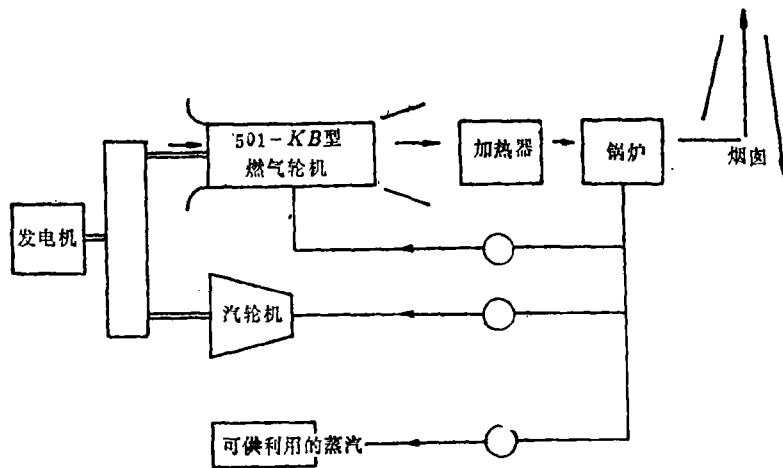


图1 各种可能系统的示意图

型式	系统	蒸汽的位置
1	双工质循环	A
2	联合生产装置(Cogen)	C
3	联合循环(CC)	B
4	DFC+Cogen	A&C
5	Cogen+CC	B&C

将根据对系统的动力和蒸汽的要求来确定成本的最有效方案, 然后评价各种系统的优缺点, 以便保证能得到最佳的选择。

本文将讨论各种方案, 并通过输出功率、热效率和可利用的蒸汽等各项来介绍不同系统的计算结果。除了主要关心的功率、热效率和蒸汽以外, 还要考虑系统的灵活性以及满足蒸汽或电力尖峰负荷的要求。

针对本文的目的，假设基本的发动机是艾莉森 501-KB 发动机。利用这台发动机可以检查加热器和锅炉将如何影响由原有发动机发展而来的DFC、联合循环或联合生产装置的整个装置的性能。501-KB发动机是一台恒速发动机，它特别适用于DFC概念，这是因为它可利用的喘振裕度及其燃烧室允许喷入大量蒸汽。该发动机在连续功率下的喘振裕度超过35%，从而它可接受大量蒸汽。把水和蒸汽喷入燃烧室的经验已经表明，燃烧室内很稳定，并且对燃烧效率的影响很小。

艾莉森分部已对501-KB发动机进行了试验。该发动机在宽广范围的涡轮进口温度和蒸汽流量下工作。这一试验证实了DFC的设计性能，试验结果表明与解析的性能估算很相一致。这些估算以对蒸汽、燃料和空气混合物热力特性的模拟计算为基础。图2和图3分别表示功率和热效率取决于蒸汽流量的关系。如图3所指出那样，评价DFC的验证试验使用了205℃的饱和蒸汽，该蒸汽可由动力厂房提供。这就不需要为这种试验另建锅炉，但是它无法综合考虑试验结果。给发动机配上锅炉，就可以产生同样数量的过热蒸汽。虽然蒸汽温度对功率的影响很小，但是它会影响到热效率。在9000公斤/小时蒸汽流量下，482℃与205℃蒸汽温度比较，其热效率从27.3%增加到39.7%。

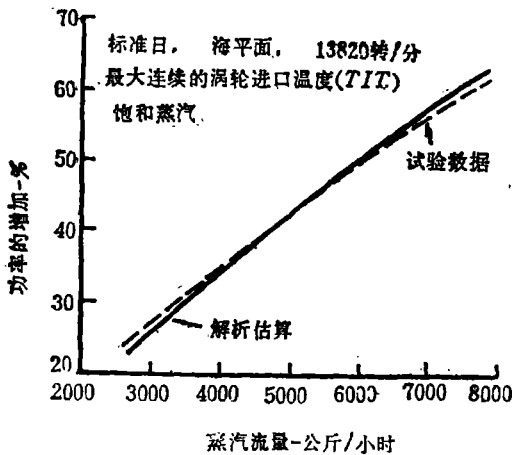


图2 艾莉森型501-KB型DFC发动机功率的试验结果与解析估算值的比较

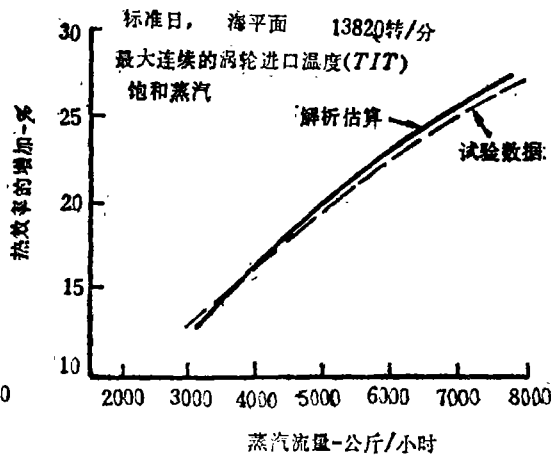


图3 艾莉森501-KB型DFC发动机热效率的试验结果与解析估算值的比较

根据这些试验结果，与501-KB型发动机结合的DFC为联合生产装置和联合循环提供了可行的方案，以便满足功率和蒸汽的需要。图4表示501-KB型DFC系统对于涡轮进口温度和蒸汽流量方阵的性能潜力。

所提议系统的其它一些部件也是已知量。涡轮排气和锅炉之间的加热器由一个普通的燃烧室组成，可以使排出的燃气达到所要求的温升，从而能够增加从锅炉出来的蒸汽的温度和/或数量。可以利用调节供入燃烧室的燃料作为控制系统输出功率和/或产生蒸汽的一种调节措施。

锅炉以现有的工艺技术为基础。蒸汽和排出燃气之间的温度差和排烟道温度都是

当前设计的典型温度。汽轮机是以大气压力排气的非冷凝式涡轮，其性能代表了当前的技术水平。

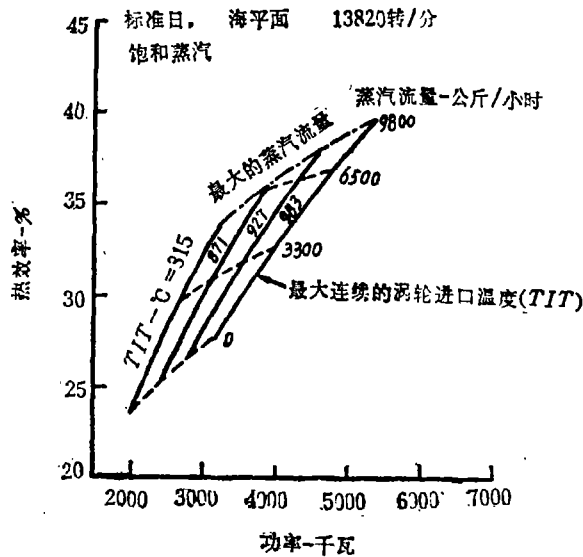


图4 501—KB型DFC系统对于各种涡轮进口温度和蒸汽流量性能潜力

表1 列出系统各个部件使用的假设和条件。五种系统的每种系统基本性能都是针对501—KB发动机在其最大连续的涡轮进口温度983℃下工作并且没有再热的情况进行计算的。计算的结果示于表2。

表1

假设和条件

基本发动机——501—KB型燃气轮机	
压气机压比=9.3	
连续的涡轮进口温度=983℃	
空气流量=15公斤/秒	
输出功率=3270千瓦	
热效率=28.3%	
锅炉	
自然循环	
用于预热的经济器	
个别段的过热器	
最高温度=760℃	
最大的蒸汽流量=13 000公斤/小时	
饱和蒸汽与冷却剂最小温差 $T=28℃$	
汽轮机	
非冷凝式	
多级轴流式	
效率=75%	

再热器

压力损失=3.0%
效率=95%
最大温升=316℃

表 2 使用501—KB发动机的各种系统性能的潜力

条件：标准日，海平面，连续额定温度，13820转/分，无再热，基本发动机——3200千瓦，
27.7%热效率，蒸汽压力—1034千帕，蒸汽温度

	系 统 形 式				
	双工质循环 (DCF)—I	联合生产 (Cogen)—II	联合循环 (CC)—III	DFC和 Cogen—IV	CC和 Cogen—V
蒸汽量—公斤/小时					
用于发动机	9000	0	0	4250	0
汽轮机	0	0	7360	0	3600
可用蒸汽	0	7360	0	3760	3760
输出量					
功率—千瓦	5400	3200	4220	4300	3720
热效率—%	39.7	27.7	36.6	34.2	31.1

注意：热效率仅依据输入的热量和输出的功率，并未考虑蒸汽的情况。把蒸汽能量包含在效率中是可以的，并且该效率将随蒸汽的状态和锅炉的假设而改变。

结 果

在以DFC（型式I）运行时，锅炉最多可产生9000公斤/小时过热蒸汽。当这些蒸汽回到燃烧室时，功率将从3210千瓦增加到5400千瓦（或增加65%），同时热效率将从28.3%增加到39.7%（热效率增加40%）。锅炉能生产的最大蒸汽量决定了功率和效率增加的极限值。蒸汽压力正好高到足以与燃烧室压力匹配。在连续的涡轮进口温度下，通过使少于最大蒸汽流量的蒸汽回到循环，就可以规定节流线。针对过热蒸汽和饱和蒸汽二种情况的节流线示于图5。因为同一台锅炉可以产生更多的具有较低温度的蒸汽，所以在发动机内，饱和蒸汽将产生更多的功率。但是，在使用饱和蒸汽而不是过热蒸汽时，由于需要附加燃料以便使燃气混合物的温度提高到涡轮进口温度，所以将给其热效率带来不利的影响。

可以看到，发动机在两种情况下的节流特性。一种是在不变的涡轮进口温度（TIT）和改变的蒸汽流量下工作，另一种是在最大的蒸汽流量和改变的涡轮进口温度下工作。可以看到，后者产生最好的性能。因为给出的功率是在减小的涡轮进口温度下得到的，所以这种节流方法也延长了发动机的寿命。

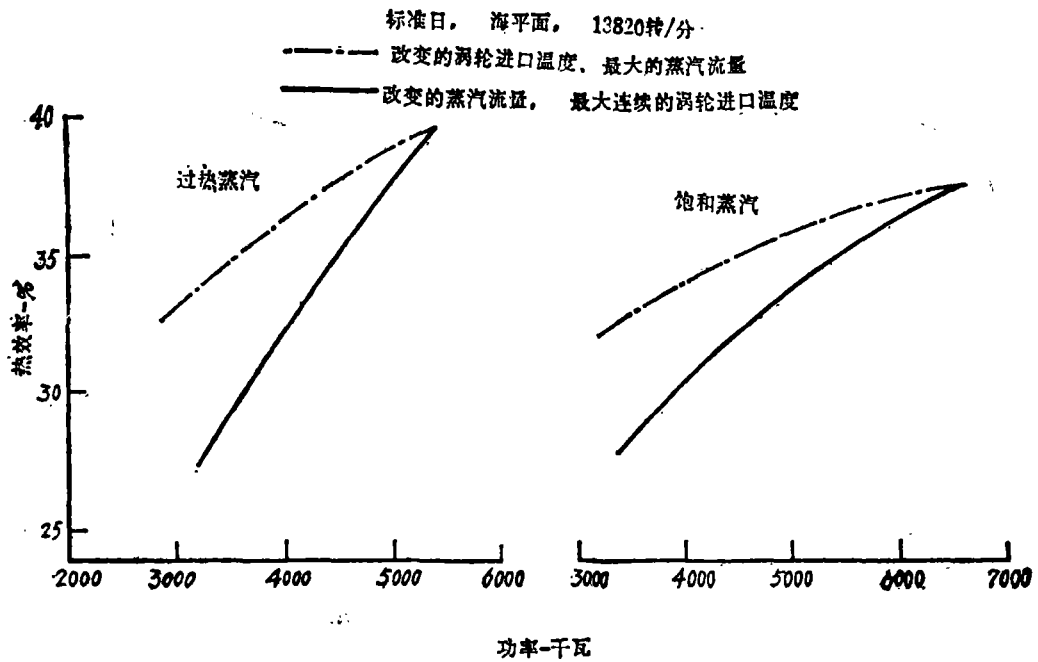


图5 具有过热蒸汽和饱和蒸汽的501—KB型DFC发动机型式I的节流线

型式II是联合生产系统，其中产生的全部蒸汽供其它应用而不是产生功率。在这种系统中，可利用的蒸汽量减少到7360公斤/小时，这是因为蒸汽不回到发动机，从而产生蒸汽的排气量较少。图6表示发动机产生蒸汽的能力。

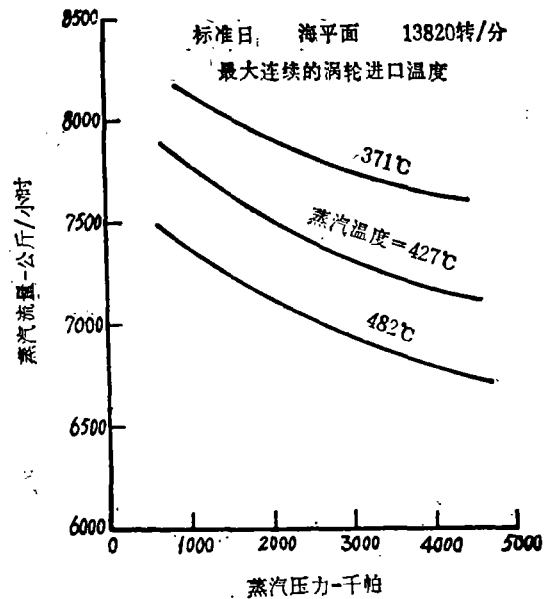


图6 使用501—KB发动机的型式II产生蒸汽的能力

表2的型式III表示使用501-KB发动机的联合循环的性能。它的输出功率和热效率示于图7。在系统内加上冷凝器并采用凝汽式汽轮机，将会增加系统的输出功率。

在DFC和联合生产结合的情况中，可以增加发动机的输出功率，并且得到的蒸汽可供过程或其他用途利用。可以改变功率随产生的蒸汽量增加的量值，以便在系统范围内满足一些特殊的要求。

表2的型式IV表示系统可供利用的蒸汽量为3760公斤/小时的情况。发动机的功率为4300千瓦。图8以蒸汽量和功率值表示型式IV的性能范围。

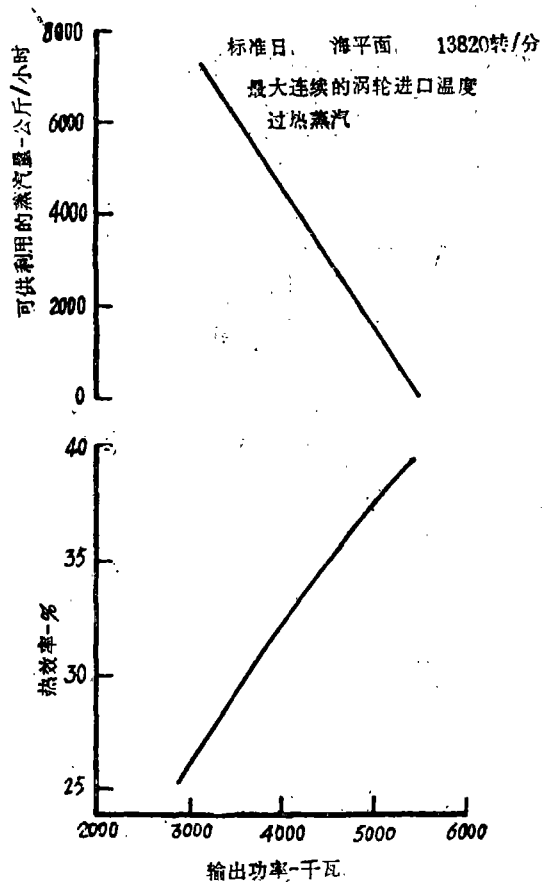
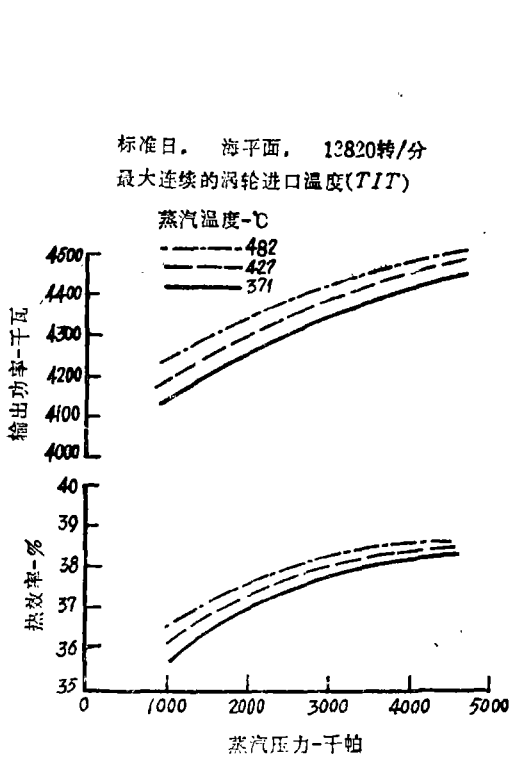


图7 使用501-KB发动机的型式III的输出功率和热效率
图8 使用501-KB发动机的型式IV可利用的蒸汽量和热效率

最后一种型式，表2的型式V，表示在其中评价联合循环和联合生产装置的系统的性能。可以看到，对于同样的蒸汽流量，其功率和热效率均低于包含DFC的系统。

如同预料的那样，在涡轮排气和锅炉之间增加再热燃烧室，是一种在损失热效率的情况下增加系统输出的方法。通过增加功率或蒸汽流量的形式增加系统的输出可用来满足尖峰输出的要求。

正如前面所说的那样，满足效率和蒸汽要求的成本最有效的系统将由具体的要求所确定。但是，从本文介绍的资料显然可以看到，DFC可以给系统提供联合生产装置和/

或联合循环不具备的一些优点。它可以使发动机的输出功率增加60%，并且在相同的涡轮进口温度下，使热效率增加40%。所以，它是一种十分理想的方案。

除了增加功率和热效率以外，DFC设计概念也增加了系统的灵活性。如果需要过程蒸汽，而该蒸汽量又小于锅炉的容量，则过剩的蒸汽可被供入发动机，从而增加了系统的整个效率。另一方面，如果蒸汽不是由发动机的排气产生，则可以把蒸汽供应给发动机，以便以高的效率值增加输出功率。

研究也表明，喘振裕度和燃烧室稳定性是把发动机改装成DFC热机的两个限制因素。

(参考文献略)

企业集团实施计划单列消息

大型联合企业在国家计划中实行单列，是改善宏观管理、改革计划体制、搞活大型企业的一项重大措施。有利于加强国家与企业集团直接对话，加快我国电力工业的建设。

计划单列的内容包括：经济计划指标与有关的社会发展计划指标。1988年先单列生产、物质、固定资产投资与技术引进、产品销售及劳动工资等计划指标。

计划单列在总体上的作法是：国家计委和国务院有关部门在制定长期和年度计划时，将企业计划指标单独列出，直接下达企业集团；国家计委与国务院有关部门下发的业务性文件直接下发企业集团；企业集团向它们直接上报计划、统计与业务性文件。

1987年4月6日国家计委正式发文，决定从1988年起对东方电站成套设备公司实行计划单列。同时批准的还有：哈尔滨电站设备成套公司、上海电气联合公司及西安电力机械制造公司。

(卓文)

(上接31页)

SZN HOT WATER BOILER DESIGN

Sun Shaojing and Chen Qiduo

Abstract

The structural design and performance characteristics of SZN hot water boilers are presented in this paper. This type of boilers features a water tube system and double grate firing with an advanced boiler configuration and simple construction, resulting in a significant saving of steel materials and high cost-effectiveness.

Key words: water tube boilers, product, design