



清华大学学术专著

燃气—蒸汽联合循环电站 热力性能分析理论与计算

段秋生

清华大学出版社

清华大学学术专著

**燃气—蒸汽联合循环电站
热力性能分析理论与计算**

段秋生

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书融会贯通近年来国内外热能动力工程领域多位大家的理论著作内容,加入作者研究工作的成果,力求理论体系完备,物理概念清晰,辩证分析深入,计算方法实用。

全书分为 10 章,主要内容包括:电站热力学循环、热力循环性能的评价、提高电站热力循环性能的途径等基础知识;燃气轮机理想循环、实际循环、简单循环、复杂循环、多轴燃气轮机循环和燃气轮机复合循环的基本概念;蒸汽轮机电站的基本构成和工作流程;余热锅炉汽水系统的构成和基本的热力学概念与工程概念;联合循环的严格热力学定义;燃气-蒸汽联合循环热力性能的焦树建分析法;蒸汽参数匹配优化的数值计算;燃气-蒸汽联合循环电站的构成与工作流程;IGCC 联合循环电站的构成和工艺流程;用于联合循环电站热力性能分析计算的工质热物性计算方法。从理论体系上看,本书基本涵盖了目前在役和在研的燃气-蒸汽联合循环电站的全部内容。

本书可作为热能动力工程领域的科研人员、企业工程师、高等院校的本科生和研究生的参考书。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

燃气-蒸汽联合循环电站热力性能分析理论与计算/段秋生.--北京:清华大学出版社,2010.11

(清华大学学术专著)

ISBN 978-7-302-22244-6

I. ①燃… II. ①段… III. ①燃气-蒸汽联合循环发电—电站—热能—性能分析
IV. ①TM611.31

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 045754 号

责任编辑:张秋玲

责任校对:赵丽敏

责任印制:杨 艳

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市春园印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:39.5 字 数:932 千字

版 次:2010 年 11 月第 1 版 印 次:2010 年 11 月第 1 次印刷

印 数:1~2500

定 价:85.00 元

产品编号:035459-01

荐言代序

该专著所论述的课题内容是目前国际上经常要考虑的问题,是目前我国的能源问题、如何节能、环保等有密切关系的学科方向。该书作者师从焦树建教授,深得焦老师学派的风韵。此书是他退休后整4年的劳动所成,其中有不少进展是作者本人发展而得,且内容很丰富,故给予推荐。推荐人在“文革”前也曾授过此课,感觉此书即使在当年六年制时内容也太丰富了。

中国科学院院士

蔡睿贤

2009.7.19

本书是在焦树建教授的专著《燃气-蒸汽联合循环的理论基础》的基础上写成的,是上述专著的进一步充实与发展。本书加入了作者自己的研究内容,使之更深入、更全面、更实用。书中吸收了近年来本领域国内外多位大家的理论著作的内容,加以融通,形成自己的理论体系,内容丰富。例如,对各种不同的燃气轮机在有流阻的情况下都作了全面的分析,这些内容,相比已有的文献是更为全面的。作者以手工计算方式或以计算机源程序方式给出的算例,可以进行验校,非常利于学习者的掌握、研究与改进,这在有关著作中是不多的。书中给出的相关计算机源程序,是对我国正在迅速发展的煤清洁利用重要战略方向之一的“以煤气化为基础的联合循环”进而煤基多联产系统的正确、规范性计算做出的创新性的贡献。我殷切希望本书能早日出版,及时为广大有关专业师生和科技工作者提供一本有很大参考价值的好书。

中国工程院院士

倪维斗

2009.7.22

此书的特点一是理论分析全面深入,不仅融合了前人在此领域的特色,又在此基础上有所发展;二是内容系统完整,涵盖了燃气-蒸汽联合循环电站直至IGCC电站所涉及的所有关键设备和子系统的热力性能分析;三是作者花大力气给出了一批具有很大实用价值的算例,不仅数据和分析计算过程完整,而且给出了相应的计算程序,对读者特别是产业部门的读者(当然也包括大学与科研部门的专业人士)非常实用。本人十分愿意推荐此书作为专著出版。

中国工程院院士

何维斗

2009.7.23

前 言

这是关于燃气-蒸汽联合循环电站热力性能分析和计算方法的专门著述。

燃用天然气和液体燃料的燃气-蒸汽联合循环在今后相当长的时期内都将是应当采用的清洁高效火力发电技术。燃用煤的燃气-蒸汽联合循环将成为洁净煤发电技术的核心,特别是 IGCC 将成为以“合成气园”为核心的多联产能源系统的关键技术,在 21 世纪将获得快速发展和应用。

本书融会贯通近年来国内外热动力工程领域多位大家的理论著作内容,加入作者研究工作的成果,力求理论体系完备,物理概念清晰,辩证分析深入,计算方法实用。以期为热动力工程领域的科研人员、企业的工程师、高等院校的本科生和研究生呈奉一本有价值的参考书。

全书分为 10 章:

第 1 章从热力学的角度介绍了电站热力学循环、热力循环性能的评价、提高电站热力循环性能的途径等基础知识。

第 2 章介绍了燃气轮机理想循环、实际循环、简单循环、复杂循环、多轴燃气轮机循环和燃气轮机复合循环的基本概念。以佐藤豪博士的著作为线索和对比依据,系统地推导了不同于佐藤豪博士用于分析各种燃气轮机循环热力性能的计算公式。给出了燃气轮机简单实际循环和多轴燃气轮机热力循环性能的计算机程序步序(也称伪程序)。

第 3 章介绍了汽轮电站的基本构成和 workflows。对同一个算例依据常规法、等效焓降法和循环函数法 3 种理论分别做了计算,算例严格按照科学程式进行。对林万超教授等效焓降法和马芳礼先生循环函数法的计算公式做了改进,把抽汽管道的压损和温降造成的能损引入计算公式中。或在每种算法算例之前,或在每种算法算例之中,对每种算法的基本物理概念做了详细、明确的阐述。

第 4 章介绍了余热锅炉汽水系统的构成和基本的热力学概念与工程概念,给出了单压余热锅炉、双压无再热余热锅炉、双压再热余热锅炉、三压无再热余热锅炉、三压再热余热锅炉热力性能的计算方法、计算程序与分析结果。其中,对余热锅炉热力性能影响因素的分析方法源自焦树建教授,此方法不只限于余热锅炉热力性能分析之用。

第 5 章以 J. H. Horlock 教授的著作为基本内容,明确了联合循环的严格热力学定义;明确地把 J. H. Horlock 教授关于联合循环电站的效率方程称为联合循环电站的本征方程,作为他人提出的分析理论、计算方法与推导的计算公式是否正确的验证标准;明确了联合循环电站两个重要的参数优化问题;分析了大多数种类的联合循环电站中存在的“非联合循环成分”的两面性作用。

第 6 章介绍了燃气-蒸汽联合循环热力性能的焦树建分析法。这是中国人自己独创的一种联合循环电站热力循环性能的分析方法,概念清楚,推导缜密,方法独特。问题的分解

比 J. H. Horlock 教授更为精细。本书做了焦树建分析法与 J. H. Horlock 教授本征方程的一致性证明。

第 7 章对配置单压余热锅炉、双压无再热余热锅炉、双压再热余热锅炉、三压无再热余热锅炉、三压再热余热锅炉的 5 种下位蒸汽轮机电站,做了蒸汽参数匹配优化的数值计算,最后做了总结。明确了余热锅炉与蒸汽轮机蒸汽参数匹配优化问题的约束条件,将优化计算结果和 Siemens 公司对应的配置方案进行了比对。

第 8 章结合几种联合循环电站的具体热力系统,分成几节内容,对不补燃余热锅炉型燃气-蒸汽联合循环电站、增压锅炉型燃气-蒸汽联合循环电站、程氏循环型燃气-蒸汽联合循环电站和湿空气透平(HAT)型燃气-蒸汽联合循环电站的构成与工作流程做了介绍。明确分析了程氏循环和 HAT 循环的热力学特征。对上述几种类型的燃气-蒸汽联合循环电站中可以进行解析求解者,做了解析求解公式的校核推导,给出了解析计算的步骤。对其中尚不便解析求解者,给出了数值求解的计算程序步骤。

第 9 章详细介绍了 IGCC 联合循环电站的构成和工艺流程,补充了相关的化学热力学的基础知识,给出了气化炉性能计算的源程序和 IGCC 联合循环场合里燃气轮机性能计算的源程序。源程序的可读性和可校验性以及融入源程序的物理概念的阐述、疑难问题的辨析、计算方法的运用和自我校验的实施,对于读者具有启发和指导作用。

第 10 章介绍了两种用于联合循环电站热力性能分析计算的工质热物性计算方法。一种是中国科学院工程热物理研究所张世铮先生推导的公式(称为张世铮公式),它是基于吴仲华先生《燃气的热力性质表》的拟合公式,在气体成分的种类上还不能完全满足 IGCC 热力性能计算的需要;另一种是《俄罗斯科学院-美国印第安纳州圣母大学的单独物质的热力性能表》中与 IGCC 联合循环电站相关的各种气体成分的热力性质表和通用计算公式,它从气体种类到温度范围两个方面可以完全满足 IGCC 电站热力性能分析计算的需要。本书给出了 298.15K 时一些物质的标准热力学函数,以满足气化炉热力性能计算的需要,并且给出了气体燃料和液体燃料的热值数据和热值的理论计算方法和算例。

从理论体系上看,本书基本涵盖了目前在役和在研的燃气-蒸汽联合循环电站的全部内容,可以使学习者对联合循环问题具有认知的宽阔视野和判别的不惑高度。从实用价值上看,书中的汽轮机循环、余热锅炉、燃气轮机循环、气化炉和下位电站蒸汽参数优化的 5 类计算程序初步构成了各类联合循环电站热力性能计算的基础平台,读者可以进行必要的修改加以使用。只是对 IGCC 来讲,还欠缺空分装置、脱硫装置与硫回收装置的性能计算,作者尚无力涉及。

鉴于作者的理论水平有限和实践经验的欠缺,恳请读者对书中的缺误予以质疑和指正。

段秋生

2010 年 1 月于清华园

目 录

1 电站热力学基础	1
1.1 电站的热力循环	1
1.1.1 研究电站热力学的目的	1
1.1.2 电站的热力循环	1
1.2 电站热力性能的评价	5
1.2.1 闭式循环电站的效率	5
1.2.2 燃料的热值	5
1.2.3 开式循环电站的效率	7
1.2.4 电站的热耗率	7
1.3 实际电站热力性能低于卡诺电站热力性能的原因	7
2 燃气轮机循环理论基础	11
2.1 燃气轮机循环概述	11
2.1.1 燃气轮机的理想循环与实际循环	11
2.1.2 燃气轮机的简单循环与复杂循环	13
2.1.3 多轴式燃气轮机循环	15
2.1.4 燃气轮机复合循环	16
2.2 单轴燃气轮机简单循环的热力学分析	29
2.2.1 单轴燃气轮机简单理想循环的热力学分析	29
2.2.2 单轴燃气轮机简单实际循环不考虑流动损失时的热力学分析	31
2.2.3 单轴燃气轮机简单实际循环考虑流动损失时的热力学分析	36
2.2.4 考虑 k 值差异时单轴燃气轮机热力性能的计算与分析	43
2.3 单轴燃气轮机复杂循环的热力学分析——提高燃气轮机热力性能的措施	45
2.3.1 燃气轮机回热循环	45
2.3.2 燃气轮机中间冷却循环	53
2.3.3 燃气轮机再热循环	62
2.4 燃气轮机循环计算程序步骤示例	79
2.5 多轴式燃气轮机的热力学分析	96
2.5.1 采用多轴式燃气轮机的目的	96
2.5.2 分轴/低压动力透平/间冷-再热-回热循环的热力学分析	109
2.5.3 分轴/高压动力透平/间冷-再热-回热循环的热力学分析	113

2.5.4	双轴/高 T-高 C-负荷、低 T-低 C/间冷-再热-回热循环的热力学分析	116
2.5.5	三轴燃气轮机热力性能分析的计算步序	118
3	汽轮机电站理论基础	129
3.1	汽轮机电站简介	129
3.1.1	汽轮机电站的构成	129
3.1.2	提高汽轮机电站循环效率的措施	130
3.2	汽轮机循环效率的计算(1)——常规算法	131
3.2.1	原始资料与数据	132
3.2.2	数据的整理与准备	135
3.2.3	汽轮机热力性能计算	143
3.3	汽轮机循环效率的计算(2)——等效焓降法	147
3.3.1	汽轮机电站的热经济性指标及其变化关系	147
3.3.2	等效焓降的概念	151
3.3.3	纯热量或热量伴随着工质进出系统的问题	162
3.3.4	算例	169
3.4	汽轮机循环效率的计算(3)——循环函数法	181
3.4.1	循环函数法的基本方法、概念与方程	181
3.4.2	主循环的循环函数分析方法	183
3.4.3	考虑辅助循环的循环函数分析方法	197
3.4.4	辅助汽、水循环的分析计算	203
3.4.5	辅助汽水循环中热量转化的规律	241
3.4.6	算例	243
4	余热锅炉的基础知识与热力学分析	259
4.1	余热锅炉的基础知识	259
4.1.1	余热锅炉汽水系统示例介绍	260
4.1.2	余热锅炉的效率	261
4.1.3	余热锅炉的温差与吸热量之间的关系	261
4.1.4	多压余热锅炉	268
4.1.5	余热锅炉的排烟温度与给水温度问题	269
4.1.6	余热锅炉中的脱硝装置	279
4.2	余热锅炉的热力学分析与计算	279
4.2.1	单压余热锅炉的计算方法、程序与性能分析	280
4.2.2	双压无再热余热锅炉的计算方法、程序与性能分析	287
4.2.3	双压再热余热锅炉的计算方法、程序与性能分析	299
4.2.4	三压无再热余热锅炉的计算方法、程序与性能分析	312
4.2.5	三压再热余热锅炉的计算方法、程序与性能分析	325

5 燃气-蒸汽联合循环电站理论基础	343
5.1 燃气-蒸汽联合循环电站的基本概念	343
5.2 燃气-蒸汽联合循环电站的基本热力学分析	349
5.2.1 串行电站	349
5.2.2 并行电站	351
5.2.3 串-并行电站	352
5.3 不补燃的余热锅炉型燃气-蒸汽联合循环电站的基本热力学分析	354
5.4 补燃的余热锅炉型燃气-蒸汽联合循环电站的基本热力学分析	357
6 燃气-蒸汽联合循环电站热力性能的焦树建分析法	365
6.1 联合循环电站的热效率公式与功率比关系式	365
6.1.1 联合循环电站的热效率公式	365
6.1.2 联合循环电站的功率比关系式	370
6.2 参数对联合循环电站热效率影响程度的分析	370
6.3 参数的选择	374
6.3.1 η_{r1} 和 η_{r2} 的选择	374
6.3.2 η_{gt} 的选择	374
6.3.3 A 值的选择	375
6.3.4 $\eta_{M,gt}$ 和 $\eta_{G,gt}$ 值的选择	377
6.3.5 η_h 值的选择	377
6.3.6 e 值的选择	378
6.3.7 η_{st} 值的选择问题	378
6.4 补燃式和不补燃式联合循环电站的特性比较	379
7 余热锅炉与汽轮机蒸汽参数匹配的优化	386
7.1 单压余热锅炉与汽轮机蒸汽参数匹配的优化	386
7.2 双压无再热余热锅炉与汽轮机蒸汽参数匹配的优化	389
7.3 双压再热余热锅炉与汽轮机蒸汽参数匹配的优化	406
7.4 三压无再热余热锅炉与汽轮机蒸汽参数匹配的优化	424
7.5 三压再热余热锅炉与汽轮机蒸汽参数匹配的优化	441
7.6 蒸汽参数优化问题小结	466
8 几种联合循环电站的介绍与热力学分析的解析计算方法	470
8.1 概述	470
8.2 不补燃余热锅炉型联合循环电站性能参数的解析解	472
8.3 增压锅炉型燃气-蒸汽联合循环电站	477
8.3.1 系统概述	477
8.3.2 焦树建分析法相关公式的推导	478
8.3.3 效率计算公式中各参数的计算与取值	483

8.3.4	增压锅炉型联合循环场合中燃气轮机最佳压比的解析计算	488
8.4	程氏循环	489
8.4.1	概述	489
8.4.2	用焦树建分析法对程氏循环进行分析	491
8.4.3	程氏循环的焦树建分析法对分析中各参数的选取与确定	499
8.4.4	程氏循环的其他两个问题	502
8.5	湿空气透平循环	503
8.5.1	概述	503
8.5.2	HAT 循环效率的数学关系式	505
8.5.3	HAT 循环计算步序和问题的处理	511
8.5.4	对 HAT 循环计算问题的总结与思考	519
9	整体煤气化联合循环电站	523
9.1	概述与系统流程介绍	523
9.1.1	概述	523
9.1.2	干法给煤的 IGCC 电站流程介绍	525
9.1.3	湿法给煤的 IGCC 电站流程介绍	542
9.2	IGCC 电站热力循环计算的基本问题	545
9.2.1	气化炉的热力计算基础	545
9.2.2	气化炉的计算模型与方法	558
9.2.3	SHELL 气化炉的预测程序	559
9.2.4	煤气清洁系统中的计算问题	575
9.2.5	IGCC 电站系统中燃气轮机的计算	583
10	工质的热物性计算	601
10.1	燃气热物性计算的张世铮公式	601
10.2	俄罗斯科学院-美国印第安纳州圣母大学的单独物质的热力性质表	604
10.3	298.15K 时一些物质的标准热力学函数	615
10.4	液体燃料与气体燃料的热值数据	616
	编后感言	619
	参考文献	620

1 电站热力学基础^[1]

1.1 电站的热力循环

1.1.1 研究电站热力学的目的(见图 1.1-1)

研究电站热力学的目的在于:

- (1) 确定电站的效率。
- (2) 使得电站效率最大。即希望对于给定的输出功 W , 消耗的燃料能量 F 最少。或者说, 对于给定的燃料能量 F , 寻求最大的输出功 W 。这是电站的热经济性问题。

比研究电站热力学的目的更进一步的两个问题是:

- (1) 将达到电站最高效率的投资、运行维护费用与节省的燃料费用做比较, 看是否合算。这是电站的技术经济性问题。

- (2) 在环境保护日益受到重视的今天, 电站的效率、投资 and 环境保护之间的关系已经提到日程上来。这是电站的环境技术经济性问题。

本书仅限于讨论电站的热经济性问题。

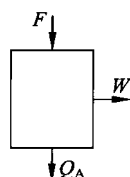


图 1.1-1 基本电站的能量平衡图

F —送入电站的燃料能量;
 W —产生的功;
 Q_A —低温下向冷源的放热量

1.1.2 电站的热力循环

1. 卡诺循环

卡诺循环(Carnot cycle)由等熵压缩、在最大温度下定温吸热、等熵膨胀、在最小温度下定温放热 4 个热力过程组成, 如图 1.1-2 所示。卡诺定理如下:

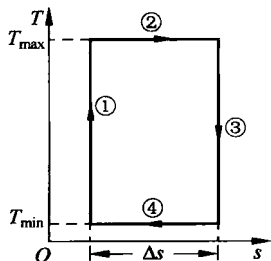


图 1.1-2 卡诺循环

定理一 在相同温度的高温热源和相同温度的低温热源之间工作的一切可逆循环, 其热效率都相等, 与可逆循环的种类无关, 与采用哪一种工质也无关。

定理二 在温度同为 T_1 的热源和同为 T_2 的冷源之间工作的一切不可逆循环, 其热效率必小于可逆循环。^[3]

卡诺循环的效率为

$$\eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{\text{放热量}}{\text{吸热量}} = 1 - \frac{T_2 \Delta s}{T_1 \Delta s} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (1.1-1)$$

在热能动力工程中, 考虑到环境保护的要求, 把最大温度

$T_{\max}$ (即 T_1) 取为 1923K (1650℃), 以控制 NO_x 的生成量。若把最小温度 $T_{\min}$ (即 T_2) 取为 298K (25℃), 则可以算出卡诺循环的效率是 84.50%。在这个高温热源温度和低温热源 (即冷源) 温度之间工作的一切不可逆循环, 如汽轮机电站的 Rankine (朗肯) 循环和燃气轮机电站的 Brayton (伯莱顿) 循环的效率, 都低于这个卡诺循环的效率数值。

2. 闭式循环电站——蒸汽轮机电站

图 1.1-3 是蒸汽轮机电站最简略的热力系统图 (其中没有画出锅炉的内部结构图, 省去了汽轮机装置的给水回热加热系统) 和对应的 $T-s$ 图 (温熵图)。空气和燃料在锅炉中燃烧, 在产生的热量中, 传给水与水蒸气的热量是 Q_B , 剩下的热量由烟气携带经烟囱排入大气。蒸汽轮机电站有 3 条工质回路:

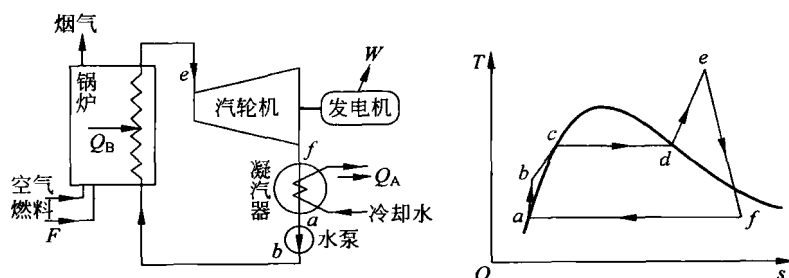


图 1.1-3 闭式循环蒸汽轮机电站与朗肯循环的 $T-s$ 图

第 1 条回路是空气与燃料燃烧生成烟气的回路。这是一条开式回路, 通常叫烟气回路。

第 2 条回路是水和水蒸气回路。给水进入锅炉, 在省煤器里吸收热量被预热, 再在蒸发器里吸收热量变成饱和蒸汽, 然后在过热器里吸收热量变成过热蒸汽, 过热蒸汽进入汽轮机做功, 做功后的乏汽进入凝汽器被冷却水冷却变成凝结水, 凝结水用水泵打入锅炉, 重复上述过程。这是一条闭式回路, 构成一个符合热力学定义的热力循环, 热力学里称其为朗肯循环。正是在这条回路里, 水泵的压缩、锅炉中的吸热、透平里的膨胀和凝汽器中的放热 4 个热力过程构成的热力循环, 使得热能可以连续地转变为机械能, 故亦称为热能动力循环。把蒸汽轮机电站称为闭式循环电站, 就是因其将热能转变成机械能的水与水蒸气回路是一条闭式回路, 是符合热力学关于热力循环定义的一条闭式回路。

第 3 条回路是冷却水 (循环水) 回路, 这也是一条开式回路。

烟气回路是朗肯循环的高温热源, 冷却水回路是朗肯循环的低温热源 (冷源)。这体现了热力学第二定律的基本内容: 要使热能连续不断地转化为机械能必须存在温差, 这是根本的条件, 故至少需要两个 (或多于两个) 温度不同的热源, 即高温热源和低温热源。^[3]

上述 3 条工质回路之间只有热量的交换而没有工质物质的掺混和交换, 这一特点为蒸汽轮机电站的热力计算带来了很大的方便。

3. 开式循环电站——燃气轮机电站

图 1.1-4 是单轴简单循环燃气轮机的简图和对应的 $T-s$ 图。燃气轮机的主机由压气机、燃烧室和透平组成。运行时, 压气机把进入压气机的空气从压气机的入口压力 p_1^* 升到压气机的出口压力 p_2^* ; 具有压力的空气在燃烧室里和喷入的燃料燃烧、掺混, 生成燃烧

室出口温度为 T_3^* 的燃气。因为空气和随后生成的燃气流经燃烧室有总压损失,所以燃烧室出口的燃气压力 p_3^* 比 p_2^* 略低一些,基本上可以把燃烧室里的燃烧过程看作定压过程。燃气进入透平膨胀做功,膨胀到透平出口压力 p_4^* ,温度也降低到 T_4^* ;然后,燃气经排气管排入大气,把排气所携带的热量散失到大气中。

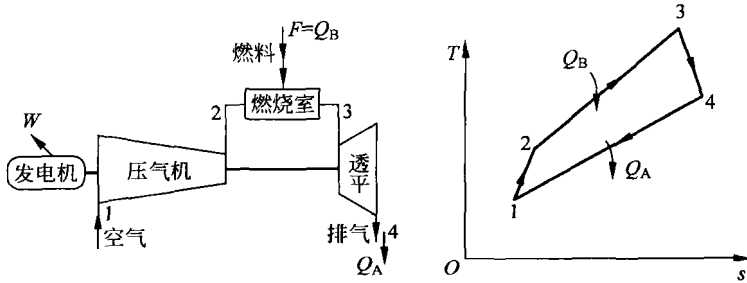


图 1.1-4 开式循环燃气轮机电站与伯莱顿循环的 $T-s$ 图

在燃气轮机正常运行时,透平产生的功率约有 $2/3$ 用来驱动压气机,剩余的功率用来驱动发电机发电或者用来携带其他种类的负荷。燃料在燃烧室里燃烧所释放出来的热量是燃气轮机循环的高温热源,而透平排气进入的大气则是燃气轮机循环的冷源。但仔细想想,燃气轮机循环并不符合热力学里对于热力循环的定义。因为在循环始点的工质是空气,循环终点的工质是燃气,工质的成分发生了变化,并且燃气的物质数量也比空气的物质数量多出所加入的燃料量。尽管燃气的温度和压力最终可以恢复到和循环始点的空气的温度和压力相同,但前两条已经说明燃气轮机循环不符合热力学中关于热力循环的定义。也就是说,在 $T-s$ 图上,压缩机里的压缩、燃烧室中的吸热、透平里的膨胀和大气中的放热这 4 个热力过程没有构成一个封闭的回路,即循环的始点和终点在 $T-s$ 图上的 1 点是不闭合的。故将其称为开式循环。这就是把燃气轮机电站叫做开式循环电站的原因。燃气轮机循环叫做伯莱顿 (Brayton) 循环。

在燃气轮机循环中,空气和燃料在燃烧室里燃烧,其中不仅有热量的交换,也有工质内容的改变和掺混。即在循环的过程中,工质由空气变成燃气,工质的成分和物质质量都有了变化。这样就在循环的热力计算上具有闭式循环蒸汽轮机电站热力计算所没有的特点和一些要特殊处理的问题。

在对燃气轮机循环进行定性分析时,为了避免工质的成分和物质质量的变化所带来的一些麻烦,使问题得以简化,常用相应的闭式循环燃气轮机电站模型来代替开式循环燃气轮机电站。闭式循环燃气轮机电站模型用图 1.1-5 表示。这个替换使得燃气轮机变为“空气轮机”,使得燃气轮机电站的总体系统完全类似于蒸汽轮机电站了,也具有 3 条只有工质之间的传热而没有工质的掺混和交换的回路。这个替换的本质是忽略了空气与燃气的成分、物质质量和热物性的差别。这是由于燃料量与空气量相比,数值上较小,空气与燃气的热物性也相差

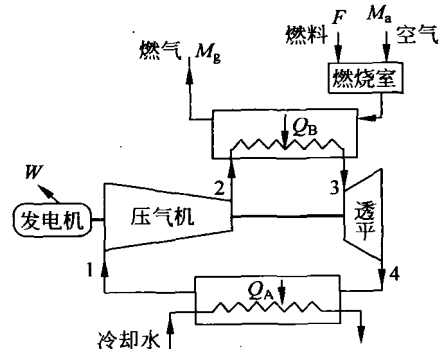


图 1.1-5 把开式循环燃气轮机电站作为闭式循环电站处理的等效图

不大。所以在对燃气轮机循环进行定性分析时,一些教科书和文献经常使用这种替换。但要强调的是,在对燃气轮机循环进行定量分析计算时,不应当使用这种替换。

4. 燃气-蒸汽联合循环电站

前面讲到,在 $T_{\max}=1923\text{K}$, $T_{\min}=298\text{K}$ 时,卡诺循环的效率是 84.50%。下面分析现代单一的蒸汽轮机电站和单一的燃气轮机电站的效率及其相关问题。

(1) 现代单一的蒸汽轮机电站的主蒸汽温度是 $823\text{K}(550^{\circ}\text{C})$ 左右,将其对应的朗肯循环嵌入 $T_{\max}=1923\text{K}$, $T_{\min}=298\text{K}$ 的卡诺循环中(见图 1.1-6(a)),就会看到,朗肯循环的输出功率只占卡诺循环输出功率的 1/3 左右。从热量损失的角度,我们都知道,蒸汽轮机电站的最大热量损失是冷却水在凝汽器中带走的热量(向冷源的放热量),但这个热量处于循环的最低温区,其有效使用价值已经很小了(即做功能力或焓值很低),如果继续使用这部分热量,就要花费高昂的代价。从热能的做功能力损失(即热能的焓损)的角度看,锅炉中高温烟气与水、水蒸气之间的大温差换热是造成蒸汽轮机电站的热能的做功能力(焓值)损失大,致使其效率只有 30%~40% 的根本原因。所以要提高单一的蒸汽轮机电站的效率,就要设计超临界机组和超超临界机组,以提高蒸汽轮机电站的主蒸汽温度,减小锅炉中高温烟气与水、水蒸气之间的换热温差。当然,在提高主蒸汽温度的同时,要求相应地提高主蒸汽的压力。

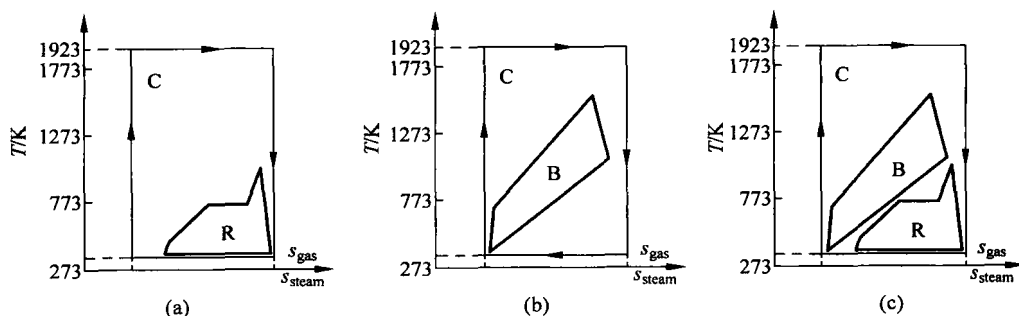


图 1.1-6 朗肯循环 R、伯莱顿循环 B、联合循环 R+B 与卡诺循环 C 的关系示意图

(2) 现代单一的燃气轮机电站的 T_3^* 温度是 $1573\text{K}(1300^{\circ}\text{C})$ 左右, T_4^* 温度是 $873\text{K}(600^{\circ}\text{C})$ 左右,将其对应的伯莱顿循环嵌入 $T_{\max}=1923\text{K}$, $T_{\min}=298\text{K}$ 的卡诺循环中(见图 1.1-6(b)),就会看到,伯莱顿循环的输出功率只占卡诺循环输出功率的 1/3 左右。显然,它的吸热过程的平均温度与 $T_{\max}=1923\text{K}$ 之间的温差比朗肯循环吸热过程的平均温度与 $T_{\max}=1923\text{K}$ 之间的温差要小很多,因此,热能在高温区的传热焓损失减小。但是其 873K 的排气温度很高,从热量损失的角度看,向冷源放出的热量损失较大,从热能的做功能力损失的角度来看,其放热过程的平均温度与 $T_{\min}=298\text{K}$ 之间的温差也较大,造成了高温排气向大气放热过程中的较大的焓损。这就是燃气轮机循环的效率只有 35% 左右的原因。

(3) 如果把伯莱顿循环叠置在朗肯循环之上一起嵌入 $T_{\max}=1923\text{K}$, $T_{\min}=298\text{K}$ 的卡诺循环中(见图 1.1-6(c)),让吸热过程平均温度高的燃气轮机以相对小的换热温差从高温热源吸收热量,燃气轮机的排气再用来产生汽轮机的主蒸汽,让放热过程平均温度低的汽轮

机以相对小的换热温差向冷源排放热量,从而组成以燃气轮机为上位电站,以蒸汽轮机为下位电站的联合电站,就避免了上面所分析的单一的燃气轮机电站和单一的蒸汽轮机电站的较大的热量损失或烟损问题,这就是燃气-蒸汽联合循环电站。现在,使用气体燃料和液体燃料的燃气-蒸汽联合循环电站的效率已达到 58% 左右。如果使用即将投入市场的 H 型燃气轮机组成燃气-蒸汽联合循环电站,其效率可以突破 60%,远远高于现在运行的单一的燃气轮机电站和单一的蒸汽轮机电站的效率,也远远高于在线运行的超临界蒸汽轮机电站和在研的超超临界蒸汽轮机电站的效率。

1.2 电站热力性能的评价

电站热力性能评价通常使用电站效率或热耗率这两个指标。

1.2.1 闭式循环电站的效率(见图 1.1-3)

汽轮机装置的效率为

$$\eta_{st} = \frac{W}{Q_B} \quad (1.2-1)$$

式中, W, Q_B 分别是一段时间里测量的做功量和吸热量。或

$$\eta_{st} = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}_B} \quad (1.2-2)$$

式中, $\dot{W}, \dot{Q}_B$ 分别是单位时间里测量的做功量和吸热量。

锅炉效率为

$$\eta_B = \frac{Q_B}{F} = \frac{Q_B}{M_F (cv)_0} \quad (1.2-3)$$

式中, M_F 为燃料量; $(cv)_0$ 为燃料的热值。 cv 是 Calorific Value 的缩写,下角标 0 指的是基准温度。

闭式循环电站的总体效率为

$$\eta_0 = \frac{W}{F} = \frac{W}{Q_B} \cdot \frac{Q_B}{F} = \eta_{st} \eta_B \quad (1.2-4)$$

1.2.2 燃料的热值^[1,4]

如果燃烧产物是在反应物进入控制面 X 的基准温度下离开控制面的,则燃料的热值 $(cv)_0$ 是单位质量的燃料在反应物进入控制面 X 的基准温度 T_0 下的发热量(见图 1.2-1)。若燃料量是 M_F ,则从控制面传出的热量是

$$F = Q_0 = M_F (cv)_0$$

1. 燃料热量的数学表达式

由控制面 X 的能量平衡,得到燃料热量的数学表达式为

$$F = Q_0 = M_F (cv)_0 = (H'_R)_0 - (H'_P)_0 \quad (1.2-5)$$

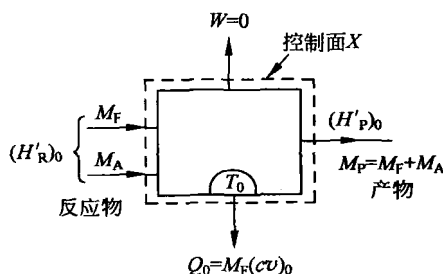


图 1.2-1 燃料的热量计算

式中, $(H_R)_0$ 和 $(H_P)_0$ 分别是反应物的焓和燃烧产物的焓, 下角标 R 和 P 分别表示反应物和生成物, 下角标 0 表示选定的基准温度。要强调的是, 即使参与燃烧过程的体系与外界没有能量交换, 但由于燃烧过程会使物质结构发生变化从而使体系的温度和压力变化很大。因此, 在研究有燃烧过程的能量平衡关系时, 不能简单地使用工程热力学中常用的由工质的热力状态来决定的内能和焓的概念, 而必须引入广义内能和广义焓的概念。在这种概念中, 不仅包括了物质的由工质的热力状态来决定的内能和焓, 而且还包括了反映物质结构特点的化学能。当物质的结构由于燃烧反应而发生变化时, 化学能就以热能的形式转化出来, 从而引起体系参数的变化。因此, 式(1.2-5)中的 $(H_R)_0$ 和 $(H_P)_0$ 应该分别是反应物和燃烧产物的广义焓。我们把工程热力学中常用的由工质的热力状态来决定的内能和焓分别称做狭义内能和狭义焓(或显焓, 物理焓), 记为 U, u 和 H, h ; 把涉及燃烧过程而使用的广义内能和广义焓记为 U', u' 和 H', h' 。这就是在式(1.2-5)中, 给反应物和燃烧产物的焓加上角标“'”的缘故, 特此说明。

燃烧过程的反应物包括燃料和氧化剂, 氧化剂通常是指氧气或空气。把在选定的温度 T_0 下, 单位质量(或体积)的燃料完全燃烧, 含有单位质量(或体积)燃料的反应物与燃烧生成物之间在温度 T_0 时的广义焓差定义为燃料在选定温度下的热值, 并以符号 $(cv)_0$ 记之, 其计量单位是 J/kg (或 J/m^3)。式(1.2-5)没有限定燃料的数量, 我们称为燃料热量的计算式。燃料的热值则限定燃料的数量为单位燃料量, 或 $1kg$, 或 $1kmol$, 或 $1m^3$, 计算式依然是式(1.2-5)。燃料的热值就是单位燃料的热量。无论是燃料的热量还是燃料的热值, 都是指燃料在选定温度下完全燃烧所释放出的热量, 可以用反应物与燃烧生成物的广义焓差来计算。另外, 无论是燃料的热量还是燃料的热值, 都与反应物中氧化剂的数量无关, 氧化剂的数量不同, 只是使得燃烧产物所达到的温度不同而已。

2. 两个不同基准温度的燃料热值的转换

说到燃料的热值, 必须清楚地指明是哪一个基准温度下的热值。在热动力领域, 常把 $15^\circ C$ 作为参考的基准温度; 而在化工领域, 常把 $25^\circ C$ 作为参考的基准温度。显然, 当我们从化工手册中查到一种燃料在 $25^\circ C$ 下的热值时, 必须把它换算成 $15^\circ C$ 下的热值, 才能将其用于热动力工程的热力计算。两种不同温度下燃料热值转换的方法参见 9.2.1 节。

燃料的热值还有高位热值和低位热值之别, 可分别标识成 $(HHV)_0$ 和 $(LHV)_0$, 通常简写成 HHV 和 LHV 。在实验室条件下测得的燃料热值与在工业设备设计计算中使用的燃料热值是有区别的。因为在实验室进行燃料热值测定时, 燃烧生成物将最终被冷却到试验前的反应物的初始温度(即选定的基准温度) $15^\circ C$ 或 $25^\circ C$, 那时, 燃烧产物中的水蒸气必然会凝结成水, 因而要释放出汽化潜热, 被测计入燃料热值之中。可是在实际的工业设备中, 燃烧产物中水的成分绝大多数情况下是以水蒸气的状态存在的, 所以在计算或折算燃料的发热量时, 燃烧产物中所含的水分都是按照水蒸气的热物性进行计算的。但是, 燃烧产物在选定的燃烧基准温度下通常都是液态的。例如, 在 T_1 温度下, 对燃烧产物中的水分计算是按照水蒸气的热物性取其比焓 $h_{H_2O(g)}$, 实际上, 在 T_1 温度下, 燃烧产物中的水分是液态, 比焓是 $h_{H_2O(l)}$, $h_{H_2O(l)} < h_{H_2O(g)}$, 两者的差值是汽化潜热。这样一来, 计算出来的燃料热值就比实验室测量出来的燃料热值要小。把实验室条件下测得的燃料热值称为高位热值, 记为 $(HCV)_0$, 也常用 HHV 表示。把燃烧产物中的水分按照水蒸气热物性计算的燃料热值称

为低位热值,记为 $(LCV)_0$,也常用 LHV 表示。两者的关系是

$$(HCV)_0 = (LCV)_0 + 2.512 \times 10^6 (9w_{H_2} + w_{H_2O}) \quad (1.2-6)$$

式中, $(HCV)_0$ 和 $(LCV)_0$ 的单位是 J/kg; w_{H_2} 是燃料中氢气含量的质量分数; w_{H_2O} 是燃料中含有的水分的质量分数。

1.2.3 开式循环电站的效率(见图 1.1-4)

1. 纯理论效率(rationnal efficiency)

$$\eta_R = \frac{W}{W_{REV}} = \frac{W}{-\Delta G_0} \quad (1.2-7)$$

式中, W 为实际输出的功; W_{REV} 为当每种反应物和每种生成物都处于选定的基准温度和基准压力时,在反应物和生成物之间得到的最大可逆输出功; ΔG_0 是从反应物到生成物的 Gibbs 函数的变化量, $\Delta G_0 = (G_P)_0 - (G_R)_0$ 。Gibbs 函数又叫自由焓, $G = H - Ts$ 。在纯理论效率的定义中,取 $W_{REV} = -\Delta G_0$ 。

2. 总体热效率(overall efficiency)

$$\eta_o = \frac{W}{-\Delta H_0} = \frac{W}{M_F(cv)_0} = \frac{W}{F} \quad (1.2-8)$$

式中, ΔH_0 是反应物和生成物都处于基准温度 T_0 时,从反应物到生成物的广义焓的变化量, $\Delta H_0 = (H_P)_0 - (H_R)_0$ 。

对燃气轮机电站,常使用的是总体热效率,而不使用纯理论效率。对于很多反应物来讲, ΔH_0 与 ΔG_0 在数值上几乎相差无几。对燃气轮机电站使用总体热效率,其本质就是用相应的闭式循环燃气轮机电站模型来替代开式循环燃气轮机电站。

1.2.4 电站的热耗率(见图 1.1-3 和图 1.1-5)

循环效率的倒数叫循环的热耗率(heat rate),表示为

$$q = \frac{1}{\eta} = \frac{Q_B}{W} \quad (1.2-9)$$

电站总体效率的倒数叫电站的总体热耗率,表示为

$$q_o = \frac{1}{\eta_o} = \frac{F}{W} \quad (1.2-10)$$

热耗率的单位是 J/(kW·h)或 kJ/(kW·h)。注意到,1kW·h=3600kJ,因此可以将效率和热耗率的数值进行换算。

1.3 实际电站热力性能低于卡诺电站热力性能的原因^[1]

在已经确定的温度上限 T_B 和下限 T_A 之间,卡诺循环的效率是最高的。用卡诺循环组成的电站叫理想(卡诺)电站(见图 1.3-1)。事实上,没有哪一种工质可以用来实现卡诺循环。所以,臆想了一种可以实现卡诺循环的流体。卡诺电站的特征是:

(1) 全部的 4 个过程都是可逆的。