

普通高等教育“十五”规划教材



CURRICULUM DESIGN OF
THERMAL POWER PLANT

热力发电厂 课程设计

主编 黄新元

主审 胡美丽



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

973161

序

由中国电力教育协会组织的普通高等教育“十五”规划教材，经过各方的努力与协作，现在陆续出版发行了。这些教材既是有关高等院校教学改革成果的体现，也是各位专家教授丰富的教学经验的结晶。这些教材的出版，必将对培养和造就我国 21 世纪高级专门人才发挥十分重要的作用。

自 1978 年以来，原水利电力部、原能源部、原电力工业部相继规划了一至四轮统编教材，共计出版了各类教材 1000 余种。这些教材在改革开放以来的社会主义经济建设中，为深化教育教学改革，全面推进素质教育，为培养一批批优秀的专业人才，提供了重要保证。原全国高等学校电力、热动、水电类专业教学指导委员会在此间的教材建设工作中，发挥了极其重要的历史性作用。

特别需要指出的是，“九五”期间出版的很多高等学校教材，经过多年的教学实践检验，现在已经成为广泛使用的精品教材。这批教材的出版，对于高等教育教材建设起到了很好的指导和推动作用。同时，我们也应该看到，现用教材中有不少内容陈旧，未能反映当前科技发展的最新成果，不能满足按新的专业目录修订的教学计划和课程设置的需要，而且一些课程的教材可供选择的品种太少。此外，随着电力体制的改革和电力工业的快速发展，对于高级专门人才的需求格局和素质要求也发生了很大变化，新的学科门类也在不断发展。所有这些，都要求我们的高等教育教材建设必须与时俱进，开拓创新，要求我们尽快出版一批内容新、体系新、方法新、手段新，在内容质量上、出版质量上有突破的高水平教材。

根据教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》的精神，“十五”期间普通高等教育教材建设的工作任务就是通过多层次的教材建设，逐步建立起多学科、多类型、多层次、多品种系列配套的教材体系。为此，中国电力教育协会在充分发挥各有关高校学科优势的基础上，组织制订了反映电力行业特点的“十五”教材规划。“十五”规划教材包括修订教材和新编教材。对于原能源部、电力工业部组织原全国高等学校电力、热动、水电类专业教学指导委员会编写出版的第一至四轮全国统编教材、“九五”国家重点教材和其他已出版的各类教材，根据教学需要进行修订。对于新编教材，要求体现电力及相关行业发展对人才素质的要求，反映相关专业科技发展的最新成就和教学内容、课程体系的改革成果，在教材内容和编写体系的选择上不仅要有本学科（专业）的特色，而且注意体现素质教育和创新能力与实践能力的培养，为学生知识、能力、素质协调发展创造条件。考虑到各校办学特色和培养目标不同，同一门课程可以有多种教材供选择使用。上述教材经中国电力教育协会电气工程学科教学委员会、能源动力工程学科教学委员会、电力经济管理学科教学委员会的有关专家评审，推

荐作为高等学校教材。

在“十五”教材规划的组织实施过程中，得到了教育部、国家经贸委、国家电力公司、中国电力企业联合会、有关高等院校和广大教师的大力支持，在此一并表示衷心的感谢。

教材建设是一项长期而艰巨的任务，不可能一蹴而就，需要不断完善。因此，在教材的使用过程中，请大家随时提出宝贵的意见和建议，以便今后修订或增补。（联系方式：100761 北京市宣武区白广路二条1号综合楼9层 中国电力教育协会教材建设办公室 010-63416237）

中国电力教育协会

前 言

本书经中国电力教育协会学科教学委员会审定，被列为普通高等教育“十五”规划教材。

本书从初步训练和培养能源动力类专业学生进行火电厂热力系统设计、计算、分析的综合能力出发，通过讲解和例题，较详尽地阐述了热力发电厂热力过程的基本计算原理和计算方法。主要内容包括：热力发电厂的热经济性计算；大型凝汽式电厂的热系统设计与计算；热电联供电厂的热系统计算与方案比选。计算方法的讲授以常规算法为主，补充了矩阵电算法、等效焓降法、循环函数法等多种计算方法。

本书内容以大型凝汽式电厂设计为重点。但考虑到我国近年来热电机组发展很快，热电厂也是能源动力类专业学生毕业后的一个重要去向，所以专设一章对热电联供电厂的知识进行讲述和练习，其中着重介绍了不同方案的比较原则和方法。

目前国内大部分热动类专业学生使用中国电力出版社出版的全国统编教材《热力发电厂》(郑体宽编)作为热力发电厂课程的基本教材。为此本书编写时，在内容的选取与详略的安排上作了相应的考虑。为便于学生的知识衔接和理解，本书使用了与上述教材尽可能一致的符号系统。

本书设计、选定的课程设计题目，力求从不同的侧面体现出对学生课程设计基本训练的要求。从这一点出发，书中例题与作业所涉及的工程、热力系统和机组也均将是否具有典型性放在第一位。

全书共分五章。由山东大学黄新元统稿，并编写第一、二章；徐夕仁编写第三章并参编第一章第三节；王乃华编写第四章并参编第一章第三节；第五章由黄新元、徐夕仁、王乃华合写。本书由浙江大学的胡美丽教授主审。对于胡美丽教授所提出的诸多宝贵意见，作者表示深深的感谢。

本书在编写过程中，还得到了各兄弟院校教师和山东电力工程咨询院的大力协助，他们提供了许多宝贵的资料和建议，在此一并致谢。

限于编者水平，书中难免出现错误或不妥之处，恳请读者批评指正。

编者

2004年4月

目 录

序

前言

第一章 课程设计基础	1
第一节 课程设计的任务与要求	1
第二节 热系统计算方法简介	4
第三节 电厂的主要热经济指标	18
第二章 凝汽式电厂原则性热力系统设计	23
第一节 原则性热力系统的设计与拟定	23
第二节 全厂原则性热力系统的计算	31
第三节 热系统变工况计算	40
第四节 例题一——600MW 凝汽式机组全厂原则性热力系统计算（设计计算）	46
第五节 例题二——600MW 凝汽式机组全厂原则性热力系统变工况计算	60
第三章 热电厂热力系统计算	77
第一节 热电厂热力计算的目的和特点	77
第二节 热负荷的确定	78
第三节 装机方案的选择与方案比较	88
第四节 例题三——常规法计算供热机组热经济性	95
第五节 例题四——循环函数法计算供热机组的热经济性	110
第四章 火电厂热力系统电算化方法	130
第一节 MATLAB 初步	130
第二节 水和水蒸气热力性质计算	138
第三节 火电厂热力系统通用并联算法	152
第五章 作业与习题	162
第一节 作业部分	162
作业一 660MW 凝汽式机组全厂原则性热力系统计算	162
作业二 660MW 凝汽式机组全厂原则性热力系统变工况计算	165
作业三 热电厂装机方案拟定与计算	166
第二节 习题部分	167
附录	169
附录 I 我国部分供热机组的主要技术参数	169
附录 II 水和水蒸气的热力性质 Matlab 程序	170
附录 III 火电厂热力系统并联算法通用程序	179
附录 IV N300MW-16.17/550/550 机组热力系统电算示例	188
附录 V 习题参考答案	195
参考文献	197

第一章 课程设计基础

第一节 课程设计的任务与要求

一、课程设计的目的和要求

热力发电厂课程设计是学生在学完热力发电厂课程后的一次综合性的训练,是本课程的重要教学环节。通过课程设计使学生进一步巩固、加深所学的理论知识并有所扩展;学习并掌握热力系统全面性计算和局部性分析的初步方法;培养学生查阅、使用国家有关设计标准、规范,进行实际工程设计,合理选择和分析数据的能力;锻炼提高运算、制图、计算机编程等基本技能;增强工程概念,培养学生对工程技术问题的严肃、认真和负责的态度。

通过课程设计应达到下列要求:

- (1) 熟悉国家有关电厂建设的政策、法规、技术导则等,树立安全、经济的观点;
- (2) 了解、学习电厂热力系统规划、设计的一般途径和方案论证、优选的原则;
- (3) 学会全面性热力系统计算和发电厂主要热经济指标计算的内容、方法;
- (4) 提高计算机绘图、制表、数据处理的能力;
- (5) 学习工程设计说明书的撰写;
- (6) 有条件的学生可进一步学习利用计算机程序解决热系统计算、分析的任务。

二、课程设计的任务与内容

本教材与电力出版社出版的全国统编教材《热力发电厂》(郑体宽编)相配套,并根据该书的内容编排与详略安排,编写了相应的课程设计题目。这些题目将从不同的侧面完成对学生基本训练的要求。教师可根据热力发电厂课程的学时以及课程设计的时间长短,选择、编组其中的一到几个课题作为课程设计的任务。

本课程设计的计算任务分成两个大的方面:一是大型火电厂凝汽式汽轮发电机组的热力系统设计及计算(第二章);二是热电联供机组的热系统计算与方案比选(第三章)。这两个大的方面可以基本上概括《热力发电厂》教材的主要部分,而且能从设计、计算角度初步满足热动类专业学生将面临的社会需求。

课程设计的主要内容包括:

1. 选题

目前国内火电机组仍以大型凝汽式机组为主力机组。国内核电站的兴建和燃气—蒸汽联合循环机组的商业运行,必将引起热力发电厂知识更新的新需求,但就热力系统设计计算而言,核电站的汽轮机回热系统与凝汽式机组没有大的差别;燃气—蒸汽联合循环的热力系统虽与常规火电厂的凝汽式机组差别较大,但热力系统的计算原则、经济分析原则等均相同;电厂各汽水参数以及主要热经济指标的计算任务仍可利用常规凝汽式电厂的热力系统计算知识加以解决。

针对我国近年来热电机组的大发展形势,《热力发电厂》教材对于这些供热机组的热力

系统设计与计算也给予了相当的篇幅进行论述。考虑到热动类学生的毕业去向, 学生选择热电联供热电厂的热力计算课题进行学习、训练也是很有意义的。

学生选题应在教师指导下进行。所选课题应能确保学生在有限的时间内得到最基本的、必须的热力系统计算知识的训练; 同时, 所选题目的类型和数量又应保证在有限时间内绝大部分学生能完成课程设计的任务。

在选题时, 允许部分学有余力的学生在完成基本课题的基础上, 进一步完成选做的课题, 以满足这部分学生扩展知识、掌握本领的需求。

2. 确定热力系统的型式及布置

这一内容能够培养学生从技术经济的观点, 运用热力学原理, 对系统的型式及布置方案作出初步的分析和拟定。在选取系统参数时, 应引导学生了解和查阅本行业国家有关的技术规程、规范及方法, 进行这方面的初步训练。当然, 有关设备选型、系统布置、参数优化等的训练, 主要应到工作岗位结合实际工程进行, 但作为课程设计的全面性要求, 应使学生对这方面的问题有所接触。

3. 进行热力计算

热力计算是本课程设计的重点, 计算是基本功, 也是本课程设计最基本的要求。本课程设计有关热力计算部分的内容包括:

- (1) 凝汽式电厂原则性热力系统的设计热力计算;
- (2) 凝汽式电厂原则性热力系统的变工况热力计算;
- (3) 热电厂供热发电机组的热力系统的设计热力计算;
- (4) 热电厂不同方案的比选计算 (循环函数法);
- (5) 凝汽式电厂汽轮发电机组的热系统 $q - \gamma - \tau$ 矩阵法 (电算法)。

这几个方面内容是可选的。在教师指导下, 一次课程设计可任选其中的一到两个课题进行训练。

4. 进行热经济性计算

主要是计算机组的和全厂的各项热经济指标。计算工况包括设计工况和变工况。

5. 绘制原则性热力系统图

绘制原则性热力系统图也是本课程设计的一个重要内容, 要求一律用计算机绘图。通过绘图, 应掌握 CAD 的初步技能, 熟悉国家有关符号标准、规范的规定。

6. 编写课程设计说明书

课程设计说明书是课程设计的成品, 是评定学生课程设计成绩的主要依据。撰写说明书, 对于学生也是一次知识归纳、综合能力的训练。课程设计说明书应包括以下几点:

- (1) 课题名称;
- (2) 内容提要;
- (3) 设计内容及要求;
- (4) 方案与系统说明或方案比较;
- (5) 设计计算书;
- (6) 原则性热力系统图;

(7) 参考文献;

(8) 设计体会。

7. 答辩与评分

课程设计的答辩工作,主要是检查学生是否独立完成课程设计的任务。答辩的提问应集中在对热力发电厂课程基本计算方法以及相关的主要概念上,指导教师应在仔细阅读学生撰写的课程设计说明书之后,有针对性地提出问题,了解、评定学生对课程设计知识的掌握程度。

答辩时,每位学生应先介绍所做课题的概况、特点和结论,然后回答教师们就本设计提出的问题。

课程设计的成绩,应依据以下三个方面进行综合评定:

(1) 设计过程是否勤奋刻苦,是否独立完成,以及出勤情况;

(2) 课程设计说明书的质量;

(3) 答辩的情况。

三、课程设计的计算类型

热力发电厂的计算类型分设计计算和变工况计算两类。设计计算是在设计一个新发电厂的热力系统时进行的计算,其目的是要取得在设计条件(如汽轮机的设计抽汽参数、回热加热参数、额定功率等)下的新汽流量和系统各抽汽流量、凝汽流量、给水流量以及机组和全厂的热经济指标。

对一个已设计好的、结构确定的系统,为取得机组在不同负荷、环境温度等非设计条件下的汽轮机的各流量和热经济指标而进行的计算,称变工况计算。对热力系统的局部部件作某些改动时进行的计算,亦属于变工况计算。

设计计算时,汽轮机抽汽参数和各加热器的进、出口参数是已知的,因此是可以直接进行的计算,总体上不需要迭代;变工况计算时,热系统的结构不变,而汽轮机的汽态膨胀过程线和各加热器的进、出口压力、焓值均已变化,因此需要先假定汽态膨胀过程线的初值,然后借助弗留格尔公式和质量、能量平衡式进行迭代计算,直至全部计算值与假定值相等。

设计计算和变工况计算都是热力系统的常用计算,在本书中对这两种计算的方法、特点均作了较详细的叙述并给出计算例题。

就计算方法而言,热系统计算有常规法、矩阵法、等效焓降法、循环函数法等。常规法的概念清晰、简洁,是最基本的和最常用的计算方法,也是《热力发电厂》教材唯一进行了阐述的方法。在进行热系统的局部定量时,等效焓降法、循环函数法具有明显的优点。例如,在进行热电厂的不同方案对比时,循环函数法只需要对变动的部分进行计算,而不需要重新计算整个系统,所以是十分简单、快捷的。矩阵法将所有计算条件列成矩阵的形式,可一次性解出全部待求参数,特别适于机算。作为对《热力发电厂》教材的知识内容的扩充,本教材对于矩阵法、等效焓降法、循环函数法等给予了可达到实用程度的叙述讲解,并作了相应的计算演示。

第二节 热系统计算方法简介

火电厂热系统计算的核心是对回热加热器的热平衡式进行求解,求得各抽汽系数,然后根据汽轮发电机组的功率,求解汽轮机进汽量以及机组热经济指标(定功率计算)或者根据汽轮机的进汽量确定汽轮发电机组的功率(定流量计算)。

回热机组的原则性热系统计算方法,有传统的常规计算方法以及等效焓降法、循环函数法等。常规计算通常有两种方法:串联法和并联法。对于热系统热平衡方程组,用手工计算求解时,为了使计算的每一个方程只出现一个未知数,计算的次序是“由高至低”,即先从抽汽压力最高的加热器算起,依次逐个算至抽汽压力最低的加热器,因此称作串联法;用计算机计算时,可以对所有的能量平衡方程联立求解,一次即可获得全部未知数,故称为并联法。串联计算也可以用计算机求解,由于不要求解方程组,是最基本、使用最普遍的计算方法;并联计算则需要求解多元线性方程组,在电算时,可以采用 $q-\gamma-\tau$ 矩阵方法进行计算。

等效焓降法的最大特点是在系统的局部结构或者参数变动时,可以进行局部定量,而不需要像常规法那样重新进行整个系统的全部计算,因而给热系统的节能分析和节能改造带来很大的方便。但等效焓降法的基本前提是各加热器的汽水参数维持设计值,如果这一条不能保证或难以忽略,则等效焓降法的计算结果会引起一定误差。另外,如果除汽轮机的内效率以外,还要求出回热系统的各汽水流量、汽水参数时,则仍需按常规计算方法求取。

循环函数法是将整个回路划分为若干单元,以求取单元进水系数为基本特征的方法。该方法的特点是将整个循环分为主循环和附加循环,分别进行计算。当热系统变动时,只需要对附加循环重新计算即可。这就给变工况计算和不同方案的比选论证带来很大的方便。尤其当用于对热电厂的不同方案进行比较、优选时,比常规方法更为便捷。

以上等效焓降法和循环函数法作为热平衡计算方法时,其物理概念不及传统方法明显,计算过程亦并不简化,但作为一种热系统分析方法,它们都可避开与变动无关的计算,而直接得到经济性指标的计算结果,因而有独特的优越性。

一、常规计算法

常规计算法的实质,实际上是对由 z 个加热器热平衡方程式和一个凝汽器物质平衡式所组成的 $(z+1)$ 个线性方程组进行求解,可解出 $z+1$ 个未知数(z 个抽汽系数 α_j 和一个凝汽系数 α_c)。然后直接求出所需要的新汽耗量或机组功率、热经济指标等。

1. 串联计算

串联计算是指按照加热器压力“由高到低”的次序,依次对各个加热器进行热平衡、流量平衡计算,独立地求得各抽汽量或抽汽系数等未知量的方法。在计算过程中,有时需要进行局部的试算,在计算完毕后再加以检查修正,但总体上是顺序的、直接的计算。

串联计算可以避开解方程组的麻烦,既可用于手算,亦可用于计算机计算。当进行变工况计算时,利用串联解法可借助计算机迭代容易地将汽态参数的变化一并计算出来,这是其他计算方法所难以做到的。

2. 并联计算 (电算方法)

电算热力系统时, 将 $z+1$ 个方程式排成矩阵来计算, 可同时解出全部抽汽系数。为计算方便, 将回热加热器的蒸汽放热量、给水焓升和疏水放热量分别用 q 、 γ 、 τ 来表示, 写成矩阵方程 $A \cdot X = T - B$ 。并联算法只要用数字填写一个矩阵, 其余工作都可以由计算机完成。矩阵系数和热力系统的结构相对应, 对于不同的热力系统结构, 只需要改变矩阵系数就可以了。因此, 该算法具有一定的通用性。另外, 由于是计算机程序, 因此电算方法也为实时测试、控制和优化提供了有力的工具。

本方法的具体描述和计算示例, 详见第四章有关内容。

二、等效焓降法

具有 n 级回热抽汽的汽轮机中, 1kg 新汽所做的实际内功称为新汽的等效焓降 H , 它等效于 $\left(1 - \sum_1^n \alpha_j \frac{\Delta h_j}{H_0}\right)$ kg 新汽在相同的初、终参数、无回热的汽轮机中所做的实际功。各级抽汽的等效焓降 H_j 是指回热系统中减少 (或增加) 1kg 抽汽时汽轮机增加 (或减少) 的实际功。它与 1kg 抽汽在某级加热器中的放热量 q_j 之比称为抽汽效率 η_j , η_j 表示从能级 j 加入单位热量, 在汽轮机上能够获得的内功。

第 j 级加热器每排挤 1kg 的抽汽, 并非全部到达凝汽器做功, 其中的一小部分将继续分流至第 j 级以下的各级加热器, 这一点是理解等效焓降法实质的关键所在。等效焓降法的所有计算公式, 加热器的序号均是按照压力从低到高升序排列的, 这一点与传统法和循环函数法是不同的。以下叙述计算方法。

1. 非再热机组

对于无中间再热的回热加热系统, 用下式计算第 j 级加热器的等效焓降 H_j :

$$H_j = (h_j - h_c) - \sum_{r=1}^{j-1} \frac{A_r}{q_r} H_r \quad \text{kJ/kg} \quad (1-1)$$

式中 h_j ——第 j 级加热器的抽汽比焓, kJ/kg ;

h_c ——汽轮机排汽比焓, kJ/kg ;

r ——第 j 级加热器后更低压力抽汽口角码;

q_r ——第 r 级加热器的抽汽放热量, kJ/kg

A_r ——取疏水放热 γ_r 或加热器焓升 τ_r , 视加热器的型式而定。

若 j 级为汇集式加热器, 则 A_r 均以 τ_r 代之。若 j 级为疏水放流式加热器, 则从 j 以下直到 (包括) 汇集式加热器, 均以 γ_r 代替 A_r , 而在汇集式加热器以下, 无论是汇集式加热器还是疏水放流式加热器, 则一律以 τ_r 代替 A_r 。

关于 q 、 γ 、 τ 的意义及计算, 详见第四章第三节的内容。

对于 1kg 新汽, 在忽略系统各附加成分损失或增益的情况下, 其实际做功, 即新蒸汽的等效焓降为

$$H = (h_0 - h_c) - \sum_{r=1}^z \frac{\tau_r}{q_r} H_r \quad \text{kJ/kg} \quad (1-2)$$

式中 h_0 ——汽轮机新汽比焓, kJ/kg ;

z ——加热器的级数。

由此看出，新蒸汽等效焓降的计算与通式(1-1)按汇集式加热器的计算方法相同，此时只须将锅炉视为一个汇集式加热器即可。

第 j 级加热器的抽汽效率 η_j 按下式计算：

$$\eta_j = \frac{H_j}{q_j} \quad (1-3)$$

汽轮机绝对内效率 η_i 按下式计算：

$$\eta_i = \frac{H}{q_0} \quad (1-4)$$

式中 q_0 ——1kg 新汽的汽轮机比热耗（或循环吸热量），kJ/kg。

热系统分析时，用下式计算机组效率 η_i 的相对变化：

$$\delta\eta_i = \frac{\eta'_i - \eta_i}{\eta_i} \times 100 = \frac{\Delta H}{H} \times 100 \quad \% \quad (1-5)$$

式中 ΔH ——新汽的等效焓降增量， $\Delta H = q_w \eta_j$ ，kJ/kg；

q_w ——相应 1kg 新汽，加入第 j 级加热器的热量，kJ/kg。

应该指出的是式(1-5)的基础是保持汽轮机的循环吸热量不变。

2. 中间再热机组

对于具有一次中间再热的回热加热系统，等效焓降的计算须计及排挤抽汽在再热器内的吸热量。故等效焓降 H_j 的计算公式，依被计算加热器在再热器前、后的位置而不同。

对于再热后的各级加热器，由于再热后的排挤抽汽不影响流过再热器的蒸汽份额，故这些加热器的等效焓降仍按式(1-1)计算。

对于再热器冷段以前（含冷段）的各级抽汽，等效焓降计算通式为

$$H_j^i = (h_j - h_c + \sigma) - \sum_{r=1}^{i-1} \frac{A_r}{q_r} H_r \quad \text{kJ/kg} \quad (1-6)$$

式中 σ ——1kg 蒸汽在再热器内的吸热量，kJ/kg。

上角标“r”表示加热器在再热器冷段之前，其余符号，意义同前。

排挤 j 级抽汽时（指再热器冷段以前的加热器），循环吸热量的变化 Δq_0 按下式计算：

$$\Delta q_0 = \Delta q_{sh} + \Delta q_{rh} \quad (1-7)$$

式中 Δq_{sh} ——锅炉蒸发吸热量的变化，kJ/kg；

Δq_{rh} ——再热器吸热量的变化，kJ/kg，按下式计算：

$$\Delta q_{rh} = \Delta a_j \cdot \sigma \cdot \prod_{r=p}^{j-1} \left(1 - \frac{\gamma_r}{q_r}\right) \quad (1-8)$$

式中 p ——与再热器冷段相接的加热器序号；

Δa_j ——热系统变动时，能级 j 的抽汽量变化量。

对于 1kg 新汽，在忽略系统各附加成分损失或增益的情况下，再热机组的实际做功，即新蒸汽的等效焓降仍按式(1-2)计算，但其中诸 H_r 的计算须依照再热器前、后分别按式(1-1)和式(1-6)进行。

热系统分析时,用下式计算机组效率 η_i 的相对变化:

$$\delta\eta_i = \frac{\eta'_i - \eta_i}{\eta_i} \times 100 = \frac{\frac{H + \Delta H}{q_0 + \Delta q_0} - \frac{H}{q_0}}{\frac{H}{q_0}} \times 100 \% \quad (1-9)$$

式中 ΔH ——新汽的等效焓降增量, $\Delta H = q_w \cdot \eta_j$, kJ/kg;

Δq_0 ——循环吸热量 q_0 的增量 (可为负值), 按式 (1-7) 计算。

三、循环函数法

循环函数法本质上是一种反平衡计算方法。它以所谓“加热单元”为基础,进行蒸汽做功和循环效率的计算。循环函数法将整个回热循环分为主循环和辅助循环两个大的部分。主循环定义为主凝结水及向其加热的各抽汽、疏水组成的工质循环。辅助循环定义为由辅助水、汽及向其加热的各抽汽、疏水组成的工质循环。

(一) 主循环有关参数及其计算

1. 加热单元

实际的回热系统由若干串连的加热器组成,包括表面式加热器和汇集式加热器。循环函数法将回热系统中每个汇集式加热器和前几个疏水放流式加热器组成一个加热单元,即加热单元不向单元外的加热器排放疏水。以图 1-1 为例,第一个加热单元由二个高压加热器和一个除氧器组成;第二个加热单元由二个低压加热器组成;第三个加热单元由一个低压加热器和凝汽器组成。

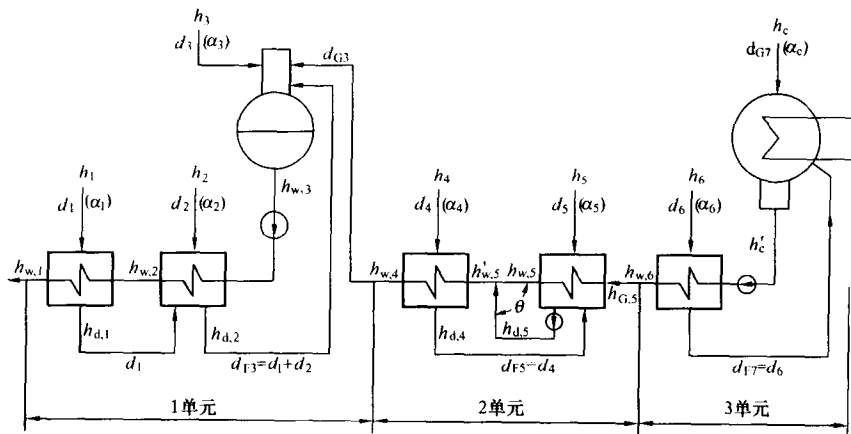


图 1-1 回热系统加热单元划分及 q 、 γ 、 τ 的计算定义

2. 单元抽汽系数、单元疏水系数

某一单元的出水量为 1kg 时,该单元内某级的抽汽量称为单元抽汽系数 d_n , 下标“ n ”表示抽汽级数序号,单元抽汽系数按下式计算:

$$d_n = \frac{\tau_n - d_{Fn} \cdot \gamma_n}{q_n} \quad (1-10)$$

式中 τ_n 、 q_n 、 γ_n ——第 n 级加热器的介质比焓升、抽汽放热和疏水放热, kJ/kg。

单元的出水量为 1kg 时, 某加热器接收的上级疏水总量称为单元疏水系数 d_{Fn} 。单元疏水系数按下式计算:

$$d_{Fn} = \sum_{j=n-u}^{n-1} d_j \quad (1-11)$$

式中 u ——本加热单元的疏水放流式加热器个数。

3. 单元进水系数

某一单元的出水量为 1kg 时, 它的进水量称为单元进水系数。以 d_{Gn} 表示, 主循环的单元进水系数按下式计算:

(1) 带除氧器的加热单元

如图 1-1 中所示的第一加热单元 ($n=3$):

$$d_{Gn} = \frac{q_n - d_{Fn}(q_n - \gamma_n)}{q_n + \tau_n} \quad (1-12)$$

(2) 带凝结水泵的加热单元

如图 1-1 中所示的第二加热单元 ($n=5$):

$$d_{Gn} = \frac{q_n - d_{Fn}(q_n - \gamma_n)}{q_n + \tau_n + \frac{\theta}{q_{n-1}}(q_n - \gamma_n)} \quad (1-13)$$

式中 $\theta = h_{d,n} - h_{w,n}$ 是以焓差表示的带疏水泵加热器的出口端差, 取焓差的数值。

(3) 带凝汽器的加热单元

如图 1-1 中所示的第三加热单元 ($n=7$):

$$d_{G7} = 1 - d_{F7} \quad (1-14)$$

式中 d_{F7} ——单元出水为 1kg 时, 向凝汽器放流疏水的总和, $d_{F7} = \sum_{j=6}^6 d_j$ 。

以上诸式中有关参量的名称和计算, 列于表 1-1。

表 1-1 加热单元各参数计算式

参 数	符 号	单 位	计 算 公 式	示 例 (图 1-1)
加热器焓升	τ_n	kJ/kg	$\tau_n = h_{w,n} - h_{w,(n+1)}$	$\tau_5 = h_{w,5} - h_{w,6}$
蒸汽放热量	q_n	kJ/kg	$q_n = h_n - h_{d,n}$	$q_5 = h_5 - h_{d,5}$
疏水放热量	γ_n	kJ/kg	$\gamma_n = h_{d,n-1} - h_{d,n}$	$\gamma_5 = h_{d,4} - h_{d,5}$
单元抽汽系数	d_n	—	$d_n = \frac{\tau_n - d_{Fn} \cdot \gamma_n}{q_n}$	$d_5 = \frac{\tau_5 - d_{F5} \cdot \gamma_5}{q_5}$
单元疏水系数	d_{Fn}	—	$d_{Fn} = \sum_{j=n-u}^{n-1} d_j$	$d_{F3} = d_1 + d_2$
单元进水系数	d_{Gn}	—	见式 (1-12 ~ 1-14)	$d_{G3} = \frac{q_3 - d_{F3}(q_3 - \gamma_3)}{q_3 + \tau_3}$

4. 锅炉进水系数和汽轮机排汽系数

汽轮机排汽量 1kg 时, 锅炉的进水量称为锅炉进水系数 A_c ; 汽轮机进汽量 1kg 时, 汽轮机的排汽量称为汽轮机的排汽系数 α_c 。对于整个热力系统, 若不计工质损失, 全部加热器出水量为 1 时的主凝结水量, 即为汽轮机的排汽系数 α_c , 显然, 锅炉进水系数与汽轮机的排汽系数互为倒数, 即 $A_c = 1/\alpha_c$ 。汽轮机的排汽系数 α_c 为各加热单元进水系数的连乘积, 以图 1-1 为例,

$$\alpha_c = d_{G3} d_{G5} d_{G7}$$

$$A_c = \frac{1}{d_{G3} d_{G5} d_{G7}} \quad (1-15)$$

5. 循环功表达式

(1) 以 1kg 汽轮机进汽为基准的循环功 w_0 按下式计算:

$$w_0 = q_0 - \Delta q_c = (h_0 - h_{fw} + \alpha_{th} \cdot q_{th}) - \alpha'_c (h_c - h'_c) \quad \text{kJ/kg}$$

式中 q_{th} ——1kg 蒸汽在再热器内的吸热量, $q_{th} = h''_{th} - h'_{th}$, kJ/kg;

α'_c ——凝汽系数, 当低加总疏水不进凝汽器时, $\alpha'_c = \alpha_c$; 当低加总疏水进凝汽器时,

$$\alpha'_c = \alpha_c + \Delta\alpha_c = \alpha_c + \frac{\alpha_{Fc} \cdot \gamma_c}{h_c - h'_c}$$

式中 $\Delta\alpha_c$ ——考虑凝汽器疏水的冷源损失的系数;

γ_c ——1kg 向凝汽器疏水的冷源损失 (图 1-1 中, $\gamma_c = h_{d,6} - h'_c$);

α_{Fc} ——进入凝汽器的疏水之和 (图 1-1 中, $\alpha_{Fc} = \alpha_{F7}$)。

其余符号意义, 参见图 1-1。

(2) 以 1kg 排汽为基准的循环功 w_c 按下式计算:

$$w_c = A_c \cdot w_0 = A_c \cdot (h_0 - h_{fw} + \alpha_{th} \cdot q_{th}) - r(h_c - h'_c) \quad \text{kJ/kg} \quad (1-16)$$

式中 r ——系数, $r = A_c \cdot \alpha'_c$ 。

6. 汽轮机组绝对内效率表达式

汽轮机组的绝对内效率 η_i 按下式计算:

$$\eta_i = 1 - \frac{\alpha'_c \cdot (h_c - h'_c)}{(h_0 - h_{fw}) + \alpha_{th} \cdot q_{th}} \quad (1-17)$$

式中各符号意义, 参见图 1-1。

(二) 辅助循环有关参数及其计算

辅助循环的汽、水引入系统的形式多种多样, 它们的单元进水系数 d'_{Gn} 、抽汽系数 d'_n 和疏水系数 d'_{Fn} 都要根据具体的情况写出。现以具有一级调节抽汽的汽轮机热力系统为例进行分析。如图 1-2 所示, 进入汽轮机的汽流可分为两股: 一股为回热凝汽汽流 C (形成主循环), 另一股为具有回热的供热汽流 T (形成辅助循环)。T 汽流从 h_0 膨胀做功到 h_T , 被抽出供热, 在热用户端放出热量 ($h_T - h'_T$) 后, 其回水以比焓 h'_T 从 #4 加热器的进口返回主凝结水, 与主凝结水混合后, 经过若干级加热器的加热, 进入锅炉重新被加热成蒸汽, 又进入汽轮机, 完成一个供热辅助循环。

图 1-3 是热网加热器疏水返回单元 (第二单元) 的放大图, 图中 $d'_{c,T}$ 表示第二加热单

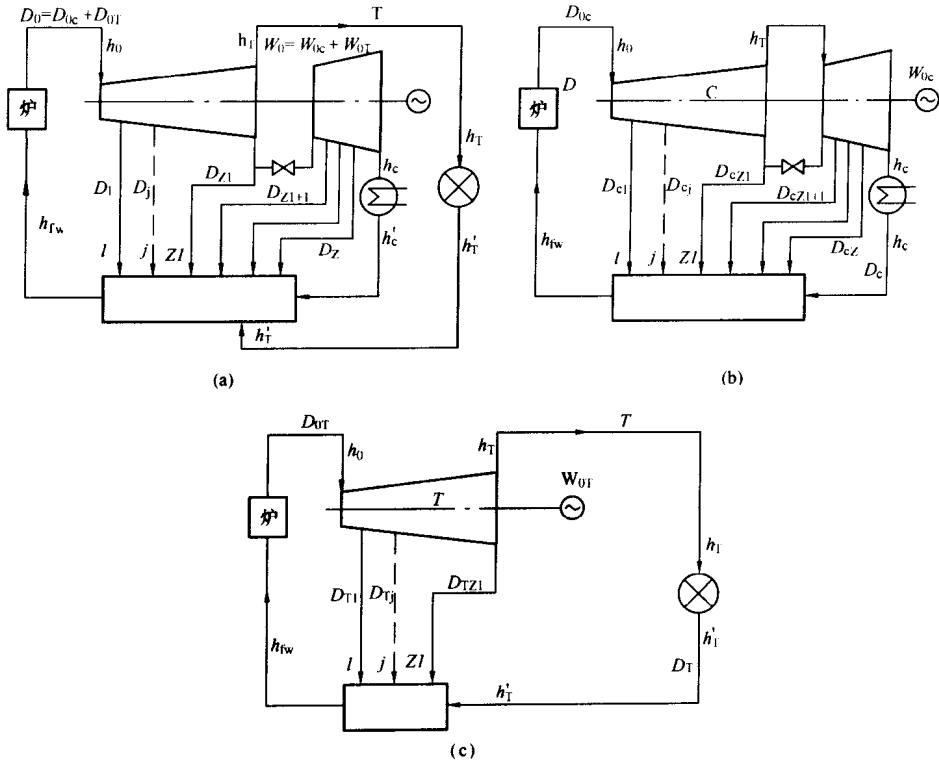


图 1-2 供热抽汽汽轮机循环的分解

(a) 实际循环; (b) 凝汽汽流循环 (主循环); (c) 供热抽汽循环 (辅助循环)

元出水流为 1kg 时热网疏水流进该单元的数量, 即单元进水系数。由于只考虑辅助循环, 故单元进口的水量为零。

1. 单元进水系数 d'_{GT}

由加热单元流量平衡:
$$1 = d'_4 + d'_5 + d'_6 + d'_{GT} \tag{1-18}$$

由 #4 加热器热平衡:
$$d'_4 = \frac{h_{w,4} - h'_T}{q_4} = d_4 - d'_{GT} \cdot d_{4T} \tag{1-19}$$

式中 d_4 ——主凝结水循环 4 号加热器的单元进水系数; $d_4 = \tau_4 / q_4$, $\tau_4 = h_{w,4} - h_{w,5}$;
 d_{4T} ——热网疏水 $d'_{G,T}$ 在 4 号加热器引起的相当抽汽系数, $d_{4T} = (h_T - h_{w,5}) / q_4$ 。

由 #5 加热器热平衡:
$$d'_5 = (1 - d'_{GT}) \frac{h_{w,5} - h_{w,6}}{q_5} = d_5 - d'_{GT} \cdot d_{5T} \tag{1-20}$$

式中 d_5 ——主凝结水循环 5 号加热器的单元进水系数, $d_5 = \frac{\tau_5 - d_4 \cdot \gamma_5}{q_5}$, $\tau_5 = h_{w,5} - h_{w,6}$;

d_{5T} ——热网疏水 $d'_{G,T}$ 在 5 号加热器引起的相当抽汽系数, $d_{5T} = \frac{\tau_5}{q_5} - d_{4T} \cdot \frac{\gamma_5}{q_5}$ 。

由 #6 加热器热平衡:
$$d'_6 = \frac{-(d'_4 + d'_5) \cdot \gamma_6}{q_6} \tag{1-21}$$

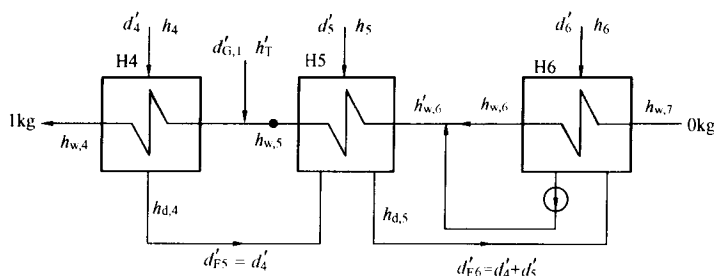


图 1-3 热网回水进系统的示意图

将式 (1-19) ~ 式 (1-21) 代入式 (1-18) 得

$$d'_{GT} = \frac{q_6 - d_{F6}(q_6 - \gamma_6)}{q_6 - (d_{4T} + d_{5T})(q_6 - \gamma_6)} \quad (1-22)$$

式中, q_6 、 d_{F6} 、 γ_6 均为主凝结水循环的参数。

2. 锅炉进水系数和汽轮机进汽系数

1kg 某辅助蒸汽或水送进回热系统后, 锅炉的进水量称为锅炉进水系数 A_x (x 为辅助汽、水的代号); 相应汽轮机的进汽量称为汽轮机的进汽系数。当汽、水来自汽轮机循环时, 汽轮机进汽系数和锅炉进水系数相同; 当汽、水不是来自汽轮机循环, 则汽轮机进汽系数为 $A_x - 1$, 故不单独赋予汽轮机进汽系数符号。

对于本例, 锅炉进水系数 $A_T = \frac{1}{d'_{G3} \cdot d'_{GT}}$

式中 d'_{G3} ——第一单元的进水系数, 等于主循环的进水系数 d_{G3} 。

3. 辅助循环的循环功表达式

以 1kg 进系统的辅助汽、水为基准的循环功 w'_x 按下式计算:

$$w'_x = A_x q_0 - \Delta q_x = A_x \cdot (h_0 - h_{fw} + \alpha_{th} \cdot q_{th}) - (h_T - h'_T) \quad \text{kJ/kg}$$

式中 h_T 、 h'_T ——供热抽汽的抽汽比焓、凝结水比焓, kJ/kg。

(三) 复合循环的分析方法

实际热力循环都是复杂循环。一般把纯回热循环作为汽轮机的主循环, 其他如汽轮机的轴封漏汽、射汽抽气用汽以及电厂的喷水减温、排污、汽水损失、补充水等则是辅助循环; 热电联产的供热机组, 其调节抽汽供热也作为辅助循环。以下仍以图 1-2 所示系统为例, 分析汽轮机主、辅循环的复合情况。

1. 进汽总流量 D_0 的组成

进汽总流量由两部分组成:

$$D_0 = D_{0c} + D_{0T} \quad \text{kg/h} \quad (1-23)$$

式中 D_{0c} ——相应于排汽量为 D_c 的进汽量, 其对应的回热凝汽循环的汽耗率是 d_{0c} , kg/h;
 D_{0T} ——相应于供热抽汽量 D_T 的进汽量, 其对应的供热抽汽循环的汽耗率是 d_{0T} , kg/h。

2. 抽汽量的组成

z_1 级以前的各级抽汽量 D_j 由两部分组成, 即 C 汽流的凝结水加热所需的抽汽量 D_{jc} 与 T 汽流的凝结水加热所需的抽汽量 D_{jT} , 如下关系式成立:

$$D_j = D_{jc} + D_{jT} \quad (j = 1, 2, \dots, z_1)$$

$$D_{0c} = D_c + \sum_{j=1}^{z_1} D_{jc} = A_c D_c \quad (1-24)$$

式中 $A_c = \frac{D_{0c}}{D_c} = 1 + \sum_{j=1}^{z_1} a_{jc}$, 其中 $a_{jc} = \frac{D_{jc}}{D_c}$ 。

设回水率 $\varphi = 1$, 则

$$D_{0T} = D_T + \sum_{j=1}^{z_1} D_{jT} = A_T D_T \quad (1-25)$$

式中 $A_T = \frac{D_{0T}}{D_T} = 1 + \sum_{j=1}^{z_1} a_{jT}$, 其中 $a_{jT} = \frac{D_{jT}}{D_T}$ 。

上述式 (1-24)、式 (1-19) 中, A_c 、 A_T 分别称为凝汽的进汽系数和供热抽汽的进汽系数。

3. 汽轮机内功的组成

抽汽供热机组汽轮机内功可分成凝汽汽流做功和供热抽汽汽流做功。用 w_{0c} 表示 $1\text{kg}D_{0c}$ 汽流 (对应汽轮机进汽) 所做的内功, w_c 表示 $1\text{kg}D_c$ 凝汽流 (对应汽轮机排汽) 所做的内功; 用 w_{0T} 表示 $1\text{kg}D_{0T}$ 供热汽流 (对应汽轮机进汽) 所做的内功, w_T 表示 $1\text{kg}D_T$ 供热抽汽流所做的内功。则对本系统,

$$w_{0c} = q_0 - \Delta q_c = (h_0 - h_{fw} + \tau_{pu}) - \alpha_c (h_c - h'_c)$$

由 $w_c = A_c w_{0c}$, 得

$$w_c = A_c (h_0 - h_{fw} + \tau_{pu}) - (h_c - h'_c)$$

同理,

$$w_{0T} = q_0 - \Delta q_T = (h_0 - h_{fw} + \tau_{pu}) - \alpha_T (h_T - h'_T)$$

$$w_T = q_0 - \Delta q_T = A_T (h_0 - h_{fw} + \tau_{pu}) - (h_T - h'_T)$$

式中 τ_{pu} ——给水泵做功, kJ/kg 。

(四) 调节抽汽辅助循环的特性系数

1. 进汽多耗系数 A_{Tc}

根据上述有关参数的定义不难写出

$$\begin{aligned} D_0 &= D_{0c} + D_{0T} = A_c D_c + A_T D_T = d_{0c} W_{0c} + d_{0T} W_{0T} \\ &= d_{0c} (W - W_{0T}) + d_{0T} W_{0T} = d_{0c} W + (d_{0T} - d_{0c}) W_{0T} \\ &= d_{0c} W + (d_{0T} - d_{0c}) w_{0T} D_{0T} = d_{0c} W + (d_{0T} - d_{0c}) w_T D_T \end{aligned} \quad (1-26)$$

上式左端 D_0 是调节抽汽供热机组做总内功量 W 时, 汽轮机的进汽量, kg/h ; 右端第一项 $d_{0c} W$ 表示机组按纯凝汽运行, 做总内功 W 时汽轮机的进汽量; 右端第二项 $(d_{0T} - d_{0c}) w_T D_T$ 表示维持总内功量不变, 调节抽汽式机组相对于纯凝汽机组多消耗 (增加) 的进汽量, 在 $(d_{0T} - d_{0c}) w_T D_T$ 中, $(d_{0T} - d_{0c}) w_T$ 表示相对于 1kg 供热抽汽汽流 D_T , 调节抽汽式汽轮机的多增加的进汽量, 称为供热汽流的进汽多耗系数 A_{Tc} :