

轮机节能技术及 工程应用

董良雄 主编



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

巍巍交大 百年书香
www.jiaodapress.com.cn
bookinfo@sjtu.edu.cn



责任编辑/关健 冯愈
封面设计/祁睿一
版式设计/大春文化



扫描二维码
关注上海交通大学出版社
“书香交大”

ISBN 978-7-313-16142-0



定价:42.00元

轮机节能技术及 工程应用

主 编 董良雄

编 委 卢金树 朱发新 李玉乐 温小飞

袁 强 龚雅萍 高军凯



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书系统全面地介绍船舶轮机工程领域的节能技术,涵盖从节能、环保等基础知识到船舶产业化节能各方面内容。包括热力学理论和节能分析方法;船舶燃料使用基本知识,燃料处理技术,燃油喷射系统设计等技术;船舶动力装置的热能回收技术,包括涡轮增压器、废热锅炉等装置的热能回收系统结构原理及使用;船舶营运节能技术,包括船型设计,柴油机工况匹配,机桨设计,航速设计等内容;辅机节能技术包括泵、轴带发电机的等技术内容;双燃料船舶及其他替代燃料等节能技术展望。

本书可作为轮机专业研究生教材,也可作为轮机管理人员的参考读物。

图书在版编目(CIP)数据

轮机节能技术及工程应用/董良雄主编. —上海:上海交通大学出版社,2017

ISBN 978-7-313-16142-0

I. ①轮… II. ①董… III. ①轮机—节能

IV. ①U676.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 289908 号

轮机节能技术及工程应用

主 编:董良雄

出版发行:上海交通大学出版社

邮政编码:200030

出 版 人:郑益慧

印 刷:杭州印校印务有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

字 数:306 千字

版 次:2017 年 1 月第 1 版

书 号:ISBN 978-7-313-16142-0/U

定 价:42.00 元

地 址:上海市番禺路 951 号

电 话:021—64071208

经 销:全国新华书店

印 张:13.5

印 次:2017 年 1 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:0571—88294385

前言 PREFACE

能源问题已成为举世关注的重大战略问题,而解决能源供需矛盾的根本方法无非是开源和节能。由此可见,开展节能工作具有多么重要的意义。相应地,由于轮机节能在提高船舶营运经济效益中的重要作用。近几年来,国内外在轮机节能技术的研究方面有很大的发展,新理论、新技术和新措施不断出现。例如主机的余热利用技术,主机轴带发电机节能技术,泵的变频调整技术等等。作为一名合格的轮机管理专业毕业生,常常要从事船用产品的开发和船用设备技术革新等多项工作,必须学习先进技术,掌握轮机节能技术的原理和方法,以适应轮机节能理论和技术的不断发展。

国内外船舶工业界和高等院校根据轮机工程专业学生的培养目标,编著了许多有关轮机节能技术的教材,比如《能效管理与节能技术》《船舶动力装置及节能技术》《能源与节能管理》《动力和热力设备节能技术》等等,这些教材都根据不同的研究重点,针对不同工业领域的特点,介绍相关节能减排政策、能效管理与节能技术;总结节能领域的先进技术成果、产品、实践经验与管理模式;探索新形势下节能工作的发展方向,为节能产业提供了较高的参考价值。但由于轮机工程技术的特殊性,大多数轮机节能产品是适应轮机工程技术发展而产生的,而目前船舶轮机的发展还具有许多不成熟的现状,许多船东和船舶设计机构都在尝试使用新一代的节能产品,但这些节能技术和产品往往还处于试验阶段,其节能效果并没有得到广泛的认同,因此相关教材往往具有一定的不适应性。目前有关节能的书籍虽多,但其结构类似,不外乎“第一章介绍节能基本概念,第二章介绍节能的主要方法”,若按照顺序教学,教师必须综合兼顾各个章节的内容,跳跃性教学,常常是讲到某个具体技术时,不得不从其中一章的某个内容讲到另一章的某个内容,导致翻来覆去,令人眼花缭乱。

总之,目前市面上缺少具有针对性的船舶轮机综合节能技术教材,或是相关教材提出的节能方法和节能技术很难适应当前船舶动力装置的运用和发展趋势,这正是本教材的编著动力。为了使学生系统地掌握轮机节能方面的基本知识和基本技能,提高学生素质和实践运用技能,根据轮机工程专业学生培养方案与相关专业课程体系的不足,结合编者多年来轮机工程专业课程的教学经验,编写了这本书。编者也力图使本书具有以下特色:

1. 适合教学的编排与内容

本书针对船舶轮机节能技术,围绕设计、制造、使用等一系列工程实际问题展开叙述,其教学目的是服务于工程实际,因此在内容上并不是从基础到应用知识的逻辑顺序,如果

学习者本身已经掌握了相关概念与原理,那么他就可以直接从工程角度去综合分析节能技术和问题,从这种目的出发,本书侧重于从实际工程中分析问题,解决问题的思路和顺序。

2. 适合船舶动力装置的节能线索

本书以最新的船舶轮机综合节能技术资料为基础,选用目前典型的现代船用动力装置为主要对象,力图反映现代轮机节能的发展状况,鉴于轮机工程学生比较熟悉船舶柴油机、船舶辅机、船舶管理等课程体系,本书依照船舶动力装置的内在逻辑结构对内容进行编排,保证知识的完整性和与相关课程的衔接、联系和配合。

3. 注重实际操作知识和能力培养

本书主要作为轮机工程专业本科生和研究生教材,满足了其所在领域相关知识的综合性,在内容的既注重船舶动力装置的理论知识,也注重其操作和设计节能技术,使得本书内容既适合船舶动力装置的设计人员,也可适合轮机管理人员及相关专业工程技术人员作为技术参考资料。

由于本书内容广泛,时间短促,编者水平有限,书中存在的不妥之处,恳请读者批评指正。

目录 CONTENT

第 1 章 绪论	1
1.1 节能的含义	1
1.2 广义的船舶节能技术	2
1.3 轮机节能的热工理论基础	5
1.4 能量品质概念及其应用	12
第 2 章 基于船舶总能系统的焓分析模型	17
2.1 船舶总能系统组成与特点	17
2.2 基于总能系统模型的柴油机热平衡分析	21
2.3 船舶废热回收单元焓分析模型	29
2.4 伙食库与空调制冷循环单元焓分析模型	31
2.5 热物性参数计算	34
2.6 基于总能系统的实例分析	39
第 3 章 柴油机燃烧节能技术	50
3.1 燃油特性及合理使用技术	50
3.2 油水乳化燃料的节油技术	56
3.3 燃油添加剂的使用	62
3.4 燃油喷射系统及节能技术	69
3.5 燃油的燃烧过程控制技术	75
第 4 章 船舶动力装置的热能回收技术	92
4.1 柴油机废热阶梯利用	92
4.2 废气涡轮增压器	99
4.3 余热锅炉的应用	108
4.4 热油加热器的应用	119
4.5 换热器的应用	122

4.6 柴油机冷却水节能利用	126
第5章 船舶推进效率提高与优化节能技术	131
5.1 船舶柴油机性能特点	131
5.2 船舶柴油机选型优化节能技术	138
5.3 船、机、桨的匹配性能及最佳航速	143
5.4 改进船型与船舶减阻节能技术	155
5.5 船舶能效设计指数	159
第6章 辅助节能技术及节能新动向	168
6.1 泵和风机的节能原理和途径	168
6.2 轴带发电机节能技术	176
6.3 电力推进技术	179
6.4 LNG-柴油双燃料动力船舶应用	184
6.5 其他辅助能源节能动向	198
参考文献	208

第1章 绪 论

1.1 节能的含义

人类社会发展的历史与能源的开发和利用水平密切相关,能源是人类生存和发展的重要物质基础。人类的进步和发展同样是建立在能源的基础之上,新能源的发现、利用很大程度上都将使得生产技术发生重大的变革,引起社会生产的发展,把国民经济在原有的基础上推向更高的发展阶段。

中国能源的特点是总量比较丰富,人均拥有量较低,分布不均衡,开发难度大。随着经济的发展,这些问题已经日益突出。中国是能源生产和能源消费大国,正处在工业化、城镇化的快速发展时期,未来能源需求总量仍将快速增长,同时增速又存在较多不确定性。中国的人均能源资源特别是优质资源储量也远远低于世界平均水平,国内资源储量越来越难以满足本国经济社会发展需要,特别是石油和天然气对外依存度将继续攀升。受发展阶段和以煤为主的资源结构的制约,能源开发和利用造成了严重的环境污染和生态破坏。中国在推动经济发展、促进社会进步的同时,还需要应对全球气候变化或者全球气候政策带来的新挑战。化工能源燃烧导致大量二氧化碳的排放,中国的能源发展面临着发达国家工业化进程时期未曾经历过的节能减排挑战。能源政策的目标是保障安全供应、保护环境和经济增长,而实现这三大目标的首要途径就是提高能源利用效率,达到节能效果。

远洋运输船舶承载了世界上 90% 的外贸货物运输任务,据最新报道显示全世界船队每年消耗燃油达到了 1.9 亿 t 左右。当前全球的石油储存量大大地减少,石油价格的不断攀升使得远洋运输的成本大大地提高,许多航运公司已经采取了相应的节油措施,在这种情况下,提高船舶能量的利用效率已经迫在眉睫,现有船舶能耗的分布及能效的评价,对于提高船舶能量利用效率将起到重要的指导意义。“十三五”期间随着世界能源资源和生态环境约束的不断强化,国际海事组织将不断制定和出台防止船舶污染环境的各项强制性规定。如何提高船舶能源利用效率、减少环境污染,已经成为船舶工业必须要解决的现实而重大的课题。根据工信部最新的有关船舶节能减排环保技术研发项目指南,船舶的能耗分布和能效评价研究是现在船舶节能方向一大重要的课题,这也是急需研究的问题。由于世界范围内金融环境衰退,航运业自从 2009 年开始持续低迷。运

力过剩导致了业内竞争愈发激烈。残酷的价格战使得很多的船公司不得不薄利求生存。在这种情况下,降低船东自身的成本就是各自首要的任务。在各项成本中,最大比例的一部分就是船舶的燃料成本。

因此,我们都有责任积极应对这场以技术带动市场的变革,尽快进行节能技术的研究并将其运用于实际的设计工作。

什么叫节能,从科学的定义来说,节能就是在满足相等需要或者达到相同的条件下,使能源(能量)消耗并减少,其减少的数量就是节能的数量。概括地说,“节能的目标是为了降低单位国民生产总值所需要的能源总量”。这也就是人们常说的,以尽可能少的能源,创造出更多社会需要的价值和产值。世界能源组织的节能委员会把技术上可行,经济上合理,环境和社会可接受的一切能更有效地利用能源资源的措施称为节能。可见,节能的实质是充分而有效地发挥能源的作用,使同样数量的能源能提供更多的有用能,从而生产出更多、更好的产品,创造出更高的产值和利益。弄清楚节能这个科学概念,关系到能源政策的地位和作用。如果认为只要减少能源消耗就是节能,那么拉闸停电、停暖气等措施也能减少能源消耗,这看法是不够全面的,真正的节能应当是能够生产相等数量和高质量的产品或者获得相等的经济收入的条件下使能源消耗量减少。也有人认为以重油代替轻油和以渣油代重油等都是节能,其实这也不够确切。虽然这些措施从运输部门来说降低了运输成本,但这种措施不仅没有减少能耗,而且增加了能耗,所以从国家的角度来说不能算节能。然而在实际工作中常把它作为节能措施来对待,在技术经济论证中有时把节省的燃料费用按价格折合成多少标准燃料量来比较,这也就是相当于节约多少燃料。

节能有狭义节能和广义节能两种。人们在生产、工作和生活中都需要直接消耗能源(煤、油、电、天然气等),如果在满足相同需要或达到相同目的的条件下降低这种直接能耗,这就是狭义节能,或者称为直接节能。

广义节能指各工厂、企业在生产过程中,除了消耗燃料、动力之外,还必须消耗原料、材料并使机器设备和厂房等逐步耗损老化,而这些东西在各自的生产过程中,都毫无例外地要消耗能源。我们知道,人们在生产、工作和生活的时候,除了直接消耗能源以外,还必须消耗和占用其他各种物质。比方说,钢铁厂生产铁除了消耗能源以外,还需要消耗烧结矿、石灰和耐火材料等各种原材料,而这些原材料的生产是需要消耗能源的。所有,任何物资都“包含”在其生产流通过程中所消耗的能源,某一种物资如果所经过的生产流通过程次数越多,那么它所“包含”的无形能源数量也就越多。

1.2 广义的船舶节能技术

从广义上,船舶运输成本是指船舶营运一年或一个航次所消耗的各项费用的总和。通常船舶年营运成本包括一年内的船员工资、折旧费、修理费、保险费、燃润料费、港口费及其他开支等。

1.2.1 船员工资

包括基本工资、伙食费、航行津贴、奖金等直接项目及劳保福利等附加项目,根据船员

配备和当时的标准(平均值)加以计算。船员工资中还应考虑编外人员、病假及公休的顶替人员、培训人员的工资。

1.2.2 折旧费

船舶的固定资产在营运过程中,由于发生磨损、锈蚀和老化,而引起价值的降低,称为“折旧”。为了积累资金,以便对船舶进行修复和更新,必须按期将其磨损等计入运输成本,用货币形式计入运输成本中的价值,称为“折旧费”。我国固定资产折旧采用直线折旧法,每年的折旧费相同,其值是由船舶造价减去船的残值(指报废时的价格)后再除以船舶使用年限而得到的。随着生产和技术的迅速发展,船舶使用年限不宜过长,现在已降至20~25年,并有进一步降至10~15年的趋势。

1.2.3 修理费

我国现行船舶的修理,分为岁修和特检两种。平均每年的修理费可按船舶造价提成,所提取的百分数分别为:长江船4.5%,沿海船3.5%,远洋船2.5%。

1.2.4 燃润料费

营运中的船舶,主机、副机和锅炉的燃、润料费,都按航次(或月度)燃料消耗报表和加油收据计算。

新建造船舶,主机服务航速时的功率取为主机最大持续功率的80%~85%。柴油机装置燃用轻油和重油的比例可按实际资料选取,或按远洋船为15%:85%,长江与沿海船为20%:80%的比例选取。耗油率取自柴油机资料,燃油单价取当时的价格。

柴油发电机组的使用功率最好按航行、装卸货、无作业停泊三种情况分别计算。使用功率确定后,即可按耗油率、使用时间及油的单价计算航次费用

辅锅炉的使用时间一般可按航次停泊时间的25%~50%计算,单位时间的耗油量可按与锅炉的蒸汽产量的比例加以估算。航次辅锅炉耗油量乘以锅炉油单价得航次费用。

润料费最好是主机、副机分别计算。简化算法可取为燃料费的一个百分数,大体上远洋与沿海船为7%~10%,长江船为16.7%,蒸汽船为2%。

1.2.5 保险费

保险费是指企业向保险公司投保的船舶险和船员险所支付的保险费用。一般根据船舶使用情况,由航运公司提出保价。为简单起见,年保险费可取为造价的一个百分数,一般干货船为0.55%,油船为0.7%。

1.2.6 港口费

与船舶登记吨有关的港口费用包括拖船、引航、码头、港务、代理等费用,可按与净吨位的比例进行计算。年开支依与净吨位及年航次数的比例,可按同航线相近的船舶换算。

与载货吨有关的费用如装卸费、理货费、代理费、税金等,按年货运量吨数计算并依货种而变。

1.2.7 其他费用

其他费用包括供应品费、企业管理费、其他开支等,一般取为总成本的15%。

在船舶营运中,节省物资也就是节省能源,这是一种间接的节能。根据这种间接节能的道理,节省任何一种人力、物力、财力和资源就意味着节能。广义节能就是在满足相同需要或达到相同目的条件下,广泛地节约能源,这是一种包括间接节能在内的完全节能。因此,在轮机节能工作中,除了要重视节约直接消耗能源的狭义节能外,还要重视和提倡间接节省能耗的广义节能,而这正是被大家所忽视的巨大节能潜力之所在。因此,广义的船舶轮机节能包括如下几个方面:

(1)机械设备与系统方面。任何船舶航行时必需的能量形式是推力、电能和热能。供应这些能量的装置是推进装置、发电装置和供汽装置,这三个装置都直接消耗燃料。以柴油机船为例,直接耗用燃料的设备是柴油主机、发电柴油机和辅助锅炉。其中,主机所耗能绝占总输入能量的70%~90%。柴油机每小时的燃料消耗量等于柴油机燃料消耗率与功率的乘积。要降低主机所耗能量,一方面是要从减少主机的能量转换损失,努力降低主机的燃料消耗率入手;另一方面是采用减少船舱所需的推进功率和营运功率等措施,诸如改进船型,减少船舶阻力,提高推进效率,采用经济航速,减速航行等等。理论和实践证明,这方面的措施能显著降低主机的燃料消耗量,提高船舶的营运效益。

众所周知,燃料在柴油机气缸中燃烧所发出的全部热量点有一部分转变为机械功,其余部分则分别通过冷却介质、排气和散热而排入海水和大气中。除转变为有效功的热量外,其热量都称为废热(或称余热)。柴油机中有59%燃料热量作为余热而排掉。回收利用这部分余热是动力装置节能的重要途径。

柴油发电机和辅助锅炉所消耗的能量也是不容忽视的,约占总输入能的16%~30%。为了减少柴油发电机和辅助锅炉的输入能量,从而减少它们的燃料消耗,除了改善这些设备本身的能量转换效率外,从动力装置总体角度应设法减少船上电能和热能的损耗,同时应研究能量综合利用的办法将它们与主机结合起来,利用主机余热能量提供船舶所需的电能和热能。

在研究船舶节能时,除了考虑上述三个直接消耗燃料的设备外,还要注意担负着不同任务而且为数众多的辅助机械设备和系统的节能。这些机械设备和系统在工作过程中都存在能量损失。这些损失的存在必然相应地增加机械能、电能和热能的消耗,从而导致增加主机、发电机和辅助锅炉的输入能,使整个动力装置效率降低。所以设法降低各类设备的能量损失,提高它们的效率也是轮机节能的一个重要途径。

(2)船体方面。船舶是一个整体,船舶节能不应仅考虑动力装置的节能,船体方面对减少主机所需功率,降低燃油耗量也起着重要作用。例如,根据国外资料介绍的38000t和45000t货船经济论证结果,以耗油最小为目标,最优的船舶主尺度及船型系数能够减少13%和19%的主机功率,一年相应可节约燃油1927t及2114t,可见船体设计也与节能密切相关;又例如改进附体线型,采用球鼻首能减少船舶阻力,因而可得到减少功率的好处;又例如采用优质船体涂料也可以显著减少主机功率的消耗。总之,从船体方面采取节能措施,减少船体阻力,同样也可以取得节约燃油的效果。

(3)运行管理方面。良好的营运管理可以取得较大的货运量和较小的燃料消耗的节能效果。提高货运量不但与船舶的性能尺度及动力装置的形式等有关,而且与良好的营运管理有密切关系。例如提高货运经营效果,根据货源的数量和流向进行船舶的合理调度,减少空载航行;通过节能管理制度,提高船员和管理人员的节能知识,减少非生产性停航;建立合理的维修管理制度和提高船员的技术素质和操作能力,使机器保持良好的技术状态,杜绝跑、冒、淌、漏等现象也都能节约燃料。

1.3 轮机节能的热工理论基础

为提高整个船舶动力装置的热经济性,不但要提高热能在各个部件中的能量转换效果,还要从整体角度考虑使热能得到最大限度的和合理的利用。因此既要揭示在能量转换过程中引起的各种损失和检验能量利用的有效程度,还要研究减少这些损失的途径和方法以及提高动力装置热能转换效果的规律。同时为研究能量的综合利用提供理论依据,使余热按其品质高低合理和充分地加以利用,从而使整个动力装置的经济性得到提高。这些内容就是动力装置节能的热工理论基础所需要阐述的问题。

1.3.1 热力学第一定律和能量平衡

在轮机工程系统中,对那些涉及能量转换或利用的系统进行设计和性能分析时,能量的有效利用程度一般采用的方法是用“热效率”和“热损失”作为衡量指标来定量地表明能量转换的效果和节能潜力的大小。如果热效率低,则说明能量的转换效果差,节能潜力大,实际上这是一种“能分析”的方法。采用热量平衡或能量平衡的方法,分析在什么部位损失的能量多?有多少能量被有效地利用了,各部位的热效率是多少?这种方法的理论依据是热力学第一定律,属于热力学第一定律分析法,这种方法在70年代末和80年代初曾在国内得到推广。

热力学第一定律是能量转换与守恒定律在热力学中的应用,后者指出:自然界一切物质都具有能量,能量不能被创造,也不会消失,只能在一定条件下从一种形态转变为另一种形态。在转换中能量的总量保持不变。

对于任何能量转换系统来说,能量转换与守恒定律可写成如下文字表达式:

$$\text{初始储存能量} + \text{输入能量} = \text{输出能量} + \text{最终储存能量}。$$

热力学第一定律是指出热能与其他形态能量的相互转化和总能量守恒。在热机主要是涉及热能与机械功之间的转换关系,因此第一定律可表述为:“热可变为功,功也可变为热;一定量的热消失时,必产生一定量的功;消耗一定量的功时,必出现与之对应的一定量的热。”

一个热力系统与外界发生相互作用,系统从外界吸收热量前对外界做功。在没有质量传输而系统的能量发生变化的情况下,热力系统能量平衡方程式可写成如下文字表达式:

$$\text{加入系统的热量} = \text{系统对外做的功} + \text{系统储存能力的变化}。$$

一般情况下,系统储存能量应包括系统的宏观动能、系统的宏观位能和系统内部的微

观能量,后者简称系统的内能。上式表达了热力系统储存的能量、传输的热量和机械功三者之间相互转换与守恒的普遍关系。对于不同的热力系统,参与转换的能量形式各不相同,因而就有相应的能量转换与转移表达式。

由于不同形式的能量可以相互转化,各种能量之间就有一定的换算关系。例如, $1\text{kW} \cdot \text{h}$ (千瓦·小时) = 3600kJ (千焦)。现在采用的国际单位制规定功、能量和热量的单位统一用“焦耳”(J), $1\text{J} = 1\text{N} \cdot \text{m}$ (牛顿·米)。

在确定系统中工质的状态和分析系统随时间的数量关系时要根据热力学第一定律做出系统的能量平衡或热平衡。对于一个与外界没有物质交换的闭口系统,如果传给系统的能量为 Q ,系统对外输出的功为 W ,系统内能的变化为 ΔU ,同时,由于闭口系统没有工质进出,所以宏观动能和重力位能可不与考虑。那么依据前述内容可写出闭口系统的能量平衡方程式:

$$Q = W + \Delta U \quad (1-1)$$

式(1-1)即为热力学第一定律的基本表达式,可适用于任何工质和任何过程。

工程上绝大多数热工设备都与外界有物质交换,是一个开口系统。系统与外界除了有功量和热量交换外,还有物质不断流入和流出系统的分界面,如图 1-1 所示。

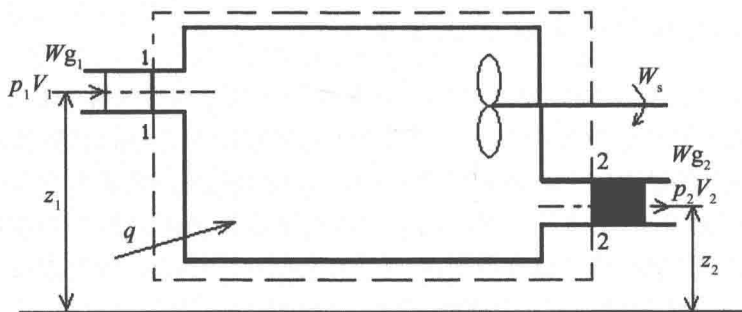


图 1-1 开口系统能量交换

因此,进入和离开系统的能量除热量和功量之外,还应包括工质流进流出系统所带进和带出的能量。假定在 $d\tau$ 时间内,状态为 p_1, V_1, T_1 , 质量为 δm_1 kg 的物质以速度 c_1 流入开口系统边界时,系统除得到物质所带进的能量 $(u_1 + \frac{1}{2}c_1^2 + gz_1)\delta m_1$ 外,还要得到将质量为 δm_1 kg 的物质推入系统时的推动功 $p_1 V_1 \cdot \delta m_1$, 这个推动功是从外界传入系统的能量。这样,随着物质流入系统,系统得到的能量为

$$(u_1 + \frac{1}{2}c_1^2 + gz_1 + p_1 v_1)\delta m_1 = (h_1 + \frac{1}{2}c_1^2 + gz_1)\delta m_1 \quad (1-2)$$

同理,流出物质状态为 p_2, V_2, T_2 质量为 δm_2 kg 能量为 $(h_2 + \frac{1}{2}c_2^2 + gz_2)\delta m_2$ 。这里, $h = u + pV$ 是工质的焓。

又设 $d\tau$ 时间内,系统吸收的热量为 δQ 。工质流进系统所做的功的 δW , 并假设系统中存储能的变化为 dE , 则根据热力学第一定律做出系统的能量平衡:

$$\delta Q = (h_2 + \frac{1}{2}c_2^2 + gz_2)\delta m_2 - (h_1 + \frac{1}{2}c_1^2 + gz_1)\delta m_1 + \delta W + dE \quad (1-3)$$

在稳定流动条件下,进入设备的全部能量等于流出设备的总能量,系统储存能的变化为而且进出流量相等。所以这时: $dE=0$, $\delta m_1 = \delta m_2 = \delta m$, 因此稳定流动开口系统的能量平衡方程式可写成

$$\delta Q = (h_2 + \frac{1}{2}c_2^2 + gz_2)\delta m - (h_1 + \frac{1}{2}c_1^2 + gz_1)\delta m + \delta W \quad (1-4)$$

$$\text{或 } Q = \Delta H + \frac{1}{2}m\Delta c^2 + mg\Delta z + W \quad (1-5)$$

对于单位质量的流体,稳定流动能量平衡方程式为

$$q = \Delta h + \frac{1}{2}\Delta c^2 + g\Delta z + W \quad (1-6)$$

对于微元过程可写成

$$\delta q = dh + \frac{1}{2}c^2 + gdz + \delta W \quad (1-7)$$

能量方程式在工程上应用最广。对于锅炉和各种加热器(见图 1-2),可按公式计算。因为 $W = 0$, 而 $\frac{1}{2}m(c_2^2 - c_1^2)$ 和 $mg(z_2 - z_1)$ 可以略去不计,则能量平衡方程简化为

$$Q = H_2 - H_1 \quad (1-8)$$

因此,工质流经锅炉或通过各种加热器时所吸收的热量等于工质焓的增量。同理,工质通过冷凝器或冷却器时所放出的热量等于工质焓的减少。

工质流经涡轮机、压气机及水泵等机械时,也可应用能量平衡方程式来分析能量间相互转换时的数量关系;图 1-2 为工质流经涡轮机和换热器时的能量平衡图,它是属稳定流动开口系统。

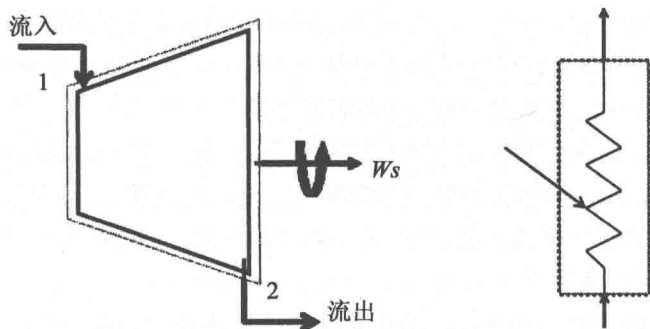


图 1-2 工质流经涡轮机、换热器时的能量平衡

在工作过程中,工质作绝热膨胀对外做功,进口和出口速度相差不大,故动能相差很少,位能的变化也极微。根据公式得

$$Q = 0, \frac{1}{2}m\Delta c^2 = 0, mg\Delta z = 0$$

则可得出

$$W = H_1 - H_2 \quad (1-9)$$

用同样方法也可求出压气机和水泵的耗功与工质压力升高的数量关系。能量方程式的其他应用这里不再另述。

利用热力学第一定律的能量不但可以确定能量系统各工质的状态和各种形式能量相

互转换的数量关系,而且还可方便地进行系统的性能分析,求出它们的效率。对于任何一个能量转换装置或一个系统,例如一个既发电又供热的热能转换装置。如果输入装置的总热能为 $\sum Q_1$,从装置施出的功(以热当量计)和热能分别为 $\sum W$ 及 $\sum Q_2$,装置总的热损失为 $\sum Q_3$ 。根据进出系统的能量相等的条件,写出热平衡方程式如下:

$$\sum Q_1 = \sum W + \sum Q_2 + \sum Q_3 \quad (1-10)$$

装置的热效率为

$$\eta = \frac{\sum W + \sum Q_2}{\sum Q_1} = 1 - \frac{\sum Q_3}{\sum Q_1} \quad (1-11)$$

通常,热效率和各项热损失可以通过热平衡试验得出。

通过上面的讨论分析,可以看出这种传统的能量平衡概念只是把不同质的能量在数量上加以平衡。所得出的热效率也仅仅表示利用到的能量与消耗掉的能量在数量上的比值。如单纯依靠这种分析方法作节能分析就会使所得结论带有不同程度的片面性和局限性。下面简单讨论一下热平衡分析法或第一定律分析法用于动力装置节能分析的不足之处。

(1)因为它仅从不同性质的能量在数量上的平衡关系来考查能量的利用程度,把品位不同的能量等量齐观,没有反映出能量品质上的差别和按质使用的合理性。因而所得的结论就不够全面,不太合理。热利用和动力利用是能量利用最重要的两种形式,但这两种利用是对能源在不同水平上的利用。将燃料用于做功发电与用于供热作比较,由于发电效率比供热效率高,如果单纯以第一定律为基础作分析,就会片面地认为将燃料用于供热较为合理。其实这是一种不全面和不公正的评价。这种利用方式是把优质能量用于低质热能完全可以满足要求的供热上;效率虽高,但却是低水平的。冬季把火炉放在室内取暖,这种取暖方式的热效率虽然也是高的,但这也是很不合理的使用方式;因为没有把燃料燃烧对达 1000°C 以上的高温热源的焓值(可用能)加以利用,从而浪费了优质热能。但是,如果采用称之为热机—热泵系统的供热方式提供取暖所需的低温热量,先通过热机将燃料焓转变为功,然后利用此功通过热泵系统提供采暖所需要的热量,根据理论计算 1kJ 燃料焓可以提供 1kJ 采暖需要的低温热量。

又例如,有时把高参数的蒸汽经过节流过程降为参数蒸汽用于加热、采暖及其他用途,此时尽管热能的数量基本上没有减少,但是它的可用能损失很大,是将优质热能作低级热量使用,浪费了高品质热能。然而,从能量守恒的观点来看,单纯的节流并不发生“能”的损失,因为根据能量方程,在绝热流动中如无动能和重力势能的变化,节流前后的焓值是不变的,所以没有热量损失。因而按热平衡分析,节流过程应是高效的。其实,节流过程是能量系统中效率最低的过程之一。所以如不从质的方面来分析,就无法对节流损失做出正确的解释。

(2)热效率的热量损失指标不能全面真实地反映节能的潜力。第一定律意义下的效率,即通常所说的热效率,与节能潜力之间并不总是存在热效率低就表示节能潜力大或者热效率高就表示节能潜力小这种相依关系。以余热利用为例,如果将中、低温余热等低品

位热源作动力回收,其热效率往往很低。例如用 80°C 的柴油机冷却水发电,在环境温度为 25°C 的条件下,其循环热效率不会超过 8.23% 。这是个相当低的数值,初看起来似乎有潜力可挖,但实际上如果能达到这一效率,则进一步节能的任何努力都将是徒劳无功的,因为这是第二定律所限定的效率。这个例子说明了节能潜力与热效率指标不相吻合,也从另一面说明低温余热作动力利用是不合理的。

冷凝器中的凝汽损失是蒸汽动力装置中最大的热损失,约为燃料热量的 50% 以上。如果单纯从能量平衡观点出发,就会把节能的重点放在冷凝器上,因为冷凝器是热损失的最大根源。所以这种努力将是徒劳的,因为仅从量的方面而不从质的方面分析“能”的问题,就有可能得到截然不同的结论。而且要从质的方面来看待“能”,就会得出不同的结论。通过熵分析法可得出凝汽器处的能量损失是不大的,而大量的损失发生在锅炉处,节能的主攻方向应是降低锅炉的熵损失。

1.3.2 热力学第二定律和熵分析

热力学第一定律被用来确定系统中工质的状态和能量之间的数量关系时,忽略了能量在数量和质量间的匹配关系,只能反映能量的外部损失。因此必须掌握第二种更科学的分析方法。这就是近年来在国内外逐渐推广的“熵分析”法。这是一种同时建立在热力学第一定律和第二定律基础上的能量的数量和质量统一的分析方法。热力学第二定律所涉及的就是能量的品位,即能量的质量问题。不同质量的能量其作功能力是不同的。

自然界内发生的所有热力过程熵是自发地向一个方向进行的。例如,热量总是自发地由高温物体传向低温物体;气体自发地在不断膨胀扩散;功可以自发地变成热(如摩擦生热)等。而相反的过程在自然界中却看不到。如果要进行反向过程,那就必须施加一定的辅助条件,亦即要付出一定的代价作为补充条件才能实现。这种须有补充和限制条件的过程来自非自发过程。例如,要把低温物体的热量转移到高温物体上去和使气体得到压缩,可分别通过制冷机和压缩机消耗一定的外功来实现;要使热量转变为功,则通过热机将一部分热量从高温热源传到低温热源,从而使另一部分热量转变为功。所以说,一切自发过程都是有方向性的,不可逆的。热力学第二定律的实质就是指出一切自然过程的不可逆性。

热力学第二定律有几种表述,但各种表达方式的实质是一致的、等效的,例如:克劳修斯 Clausius 说法:“热不可能自发地、不付代价地、从低温物体传到高温物体”;开尔文说法:“不可能从单一热源吸取热量使之完全变为有用功而不产生其他影响。”前一种说法是说明能量传递现象,后者则说明能量转换现象,但它们反映的是同一客观规律——自然过程的方向性和不可逆性,所以是一致的。如果第一种表达不成立,即热可以不付代价地对低温传向高温,那么就可以按图 1-3 的原理设计热机。循环发功机 E 从高温热源吸入热量 Q_1 ,将其中一部分 $Q_1 - Q_2 = W$ 转化为机械能,其余部分 Q_2 排入低温热源。如果热量 Q_2 可以不付代价地从低温热源送回高温热源,如图中虚线示出的那样,那么就相当于可以制成事实上的单热源热机,从而违背了上述的第二种表述。所以若克劳修斯说法不成立,则开尔文说法也不成立。同理,若违反第二种说法,也必然可引出违反第一种说法的结果。

综上所述,可以得到这样一个很重要的概念:功可以自发地全部转变成热,而热不能全