

高等学校教材

蒸汽发动机

吕燦仁 李汉炎編

人民教育出版社

本书系天津大学热工学教研室吕燦仁和李汉炎同志根据1962年5月高等工业学校教学工作會議审訂的三种“热工学教学大綱”(二种“試行草案”，一种“参考草案”)、教育部“关于编写高等工业学校基础課程和技术基础課程教材的几項原則(草案)”以及热工学課程教材編审委员会的建議編写的。由热工学教材編审委员会委托西安交通大学吳有榮同志审閱。

全书分三章。第一章为蒸汽发动机总論，从热能有效利用的观点出发，着重蒸汽动力的全面論述。說明蒸汽发动机能量的轉換关系、經濟指标和共同术语。第二章和第三章为蒸汽机和蒸汽輪机，討論它的工作原理、基本构造、性能、选择和运行管理，以及必要的热力計算。

本书是高等工业学校热工学課程教学参考书之一。除可供高等工业学校非动力类专业作为教学参考书外，也可作为內燃机、汽車拖拉机、压缩机、供热供煤气及通風等专业热机学課程蒸汽发动机部分的教材，还可供工程技术人员参考。

蒸 汽 发 动 机

呂燦仁 李汉炎編

北京市书刊出版业營業許可証出字第2号

人民教育出版社出版(北京景山东街)

人 民 教 育 印 刷 厂 印 装

新华书店北京发行所发行

各 地 新 华 书 店 經 售

統一书号 K15010·1126 开本 850×1168 $\frac{1}{32}$ 印张 5 $\frac{2}{16}$ 插頁 3

字数 130,000 印数 0,001—1,200 定价 (7) 半 0.70

1963 年 12 月第 1 版 1963 年 12 月北京第 1 次印刷

序

本书是高等工业学校技术基础课程“热工学”的教学参考书。供要求蒸汽动力方面知識較多的非动力类专业应用,也可給內燃机、汽車拖拉机、压缩机、供热供煤气及通風等专业作为热机学课程蒸汽发动机部分的教材。

根据高等工业学校热工学课程教材編审委员会的建議,热工学热工設備部分的教学参考书,按鍋炉設備、蒸汽发动机、內燃机等分册出版,以便不同专业学生可按专业要求选用,本书即为其中之一。在編写本书时,系以1962年5月高等工业学校教学工作會議上审訂的三种“热工学教学大綱(二种“試行草案”,一种“参考草案”)、教育部“关于編写高等工业学校基础课程和技术基础课程教材的几項原則(草案)”以及热工学课程教材編审委员会的建議为依据。本书正文中的叙述力求主次分明,詳略恰当。一些引伸性的和編入正文后会影影响层次分明的材料,以及对青年教师和学生必要的一些提示,都采用脚注的形式注在正文的下面。部分内容还用小字排印。以便不同讀者可按需要选择。这种編写教材的方法是一种新嘗試,我們希望对貫徹“因材施教”的原則能有一些帮助和益处。

全书分三章。第一章为蒸汽发动机总論,从热能有效利用的观点出发,着重蒸汽动力的全面論述。說明蒸汽发动机能量轉換的关系、經濟指标和共同術語。第二章和第三章分别为蒸汽机和蒸汽輪机,以討論工作原理、基本构造、性能、选择 and 运行管理为主,在热力計算方面也作了必要的叙述。全书对蒸汽发动机可以同时适应供热的特点給予了应有的重視,对蒸汽机的应用范围和发展作了比較全面的分析。

本书在編写过程中,回顾了几年来的教学工作,参考了天津大学热

工学教研室原来編写的讲义及国内外已出版的热工学教材的有关部分。在我国自己編写出版的教材中，較多的吸收了清华大学热工学教研組編“热工学”(人民教育出版社，一九六〇年第一版)一书的材料，并选用书中插图十三幅，特此声明并表謝意。

本书第一章、第二章和第三章的第十二节由呂燦仁同志編写，第三章的第一到第十一节由李汉炎同志編写。原稿承何志迈同志細心閱讀，提出的一些宝贵意見均已采納。此外，也得到天津大学热工学教研室其他一些同志的帮助，在此一并致謝。

热工学課程教材編审委员会委托的本书审閱人为西安交通大学吳有荣同志，他在审閱过程中提出許多宝贵意見和指正，使本书有不少改进，編者在此表示深切的感謝。

限于編者的教学和业务水平，本书定有不妥和謬誤疏漏之处，恳切希望使用本书的讀者批評指正。

編 者

于天津大学热工教研室

一九六三年十月

目 录

序	·v
第一章 总論	·1
§ 1-1. 蒸汽发动机在国民經济中的重要性	·1
§ 1-2. 蒸汽发动机的发展簡史	·4
§ 1-3. 蒸汽动力装置的基本热力循环(朗肯循环)	·7
§ 1-4. 蒸汽发动机的經济指标	·11
§ 1-5. 蒸汽动力装置的燃料消耗率和总效率	·16
§ 1-6. 提高蒸汽动力装置热效率的基本途徑	·20
§ 1-7. 蒸汽动力和热化事业	·23
第二章 蒸汽机	·28
§ 2-1. 蒸汽机的构造及其工作原理	·28
§ 2-2. 蒸汽机的示功图和功率的測定	·33
§ 2-3. 蒸汽机的运行特性曲綫	·42
§ 2-4. 蒸汽机内部的主要損失及其減輕方法	·45
§ 2-5. 蒸汽机的配汽	·47
§ 2-6. 蒸汽机的調节	·57
§ 2-7. 蒸汽机的調滑	·63
§ 2-8. 蒸汽机的凝汽器	·67
§ 2-9. 鍋駝机	·69
§ 2-10. 蒸汽机的运行管理	·75
§ 2-11. 蒸汽机的应用范围、发展和我国制造概况	·78
第三章 蒸汽輪机	·81
§ 3-1. 蒸汽輪机的基本概念	·81
§ 3-2. 噴管与叶片	·88
§ 3-3. 蒸汽在噴管和叶片通道中的能量轉換	·92
§ 3-4. 級內損失、輪內功率、相对內效率和最佳速度比	·98
§ 3-5. 多级汽輪机的特点	·105
§ 3-6. 通汽部分的构造 轉子和軸	·109
§ 3-7. 汽輪机的靜止部件	·115
§ 3-8. 汽輪机的分类、构造实例和我国制造概况	·123
§ 3-9. 汽輪机的調节机构	·129

§ 3-10. 汽輪机的油系統和凝汽系統.....	136
§ 3-11. 汽輪机运行特性和管理的基本知識.....	141
§ 3-12. 汽輪机与蒸汽机的比較.....	148
附录	151
表 1. 国产某些鍋駝机的技术数据	151
表 2. 国产某些蒸汽机的技术数据和主要用途	152
表 3. 国产汽輪机主要品种的技术数据	153
参考书刊	155
名詞索引	157

第一章 总論

§ 1-1. 蒸汽发动机在国民經济中的重要性

蒸汽发动机与热机

各种依靠热能发生动力(或变热为功)的机械装置, 通称热力发动机, 简称热机。

热机的种类很多, 一般可以按热机的工质(即热轉变为功时的媒介物质)和能量轉換的方式分类。按工质可分为: 燃气发动机和蒸气发动机两大类; 按能量轉換的方式, 則大致可分为: 依靠压力势能改变的活塞式热机(一般是往复运动的)和依靠动能改变的叶輪式热机(总是作迴轉运动的)两大类^①。

燃气发动机的工质为燃气或气体, 工质接受燃料所释放出来的热能是在热机内部完成的, 燃料的燃燒产物——燃气就是热机的工作介质, 故这种热机亦称为内燃机。例如柴油机、燃气輪机等。

蒸气发动机的工质是蒸气, 主要为水蒸气(简称蒸汽)。以水蒸气为工质的热机通称为蒸汽发动机^②。这类热机, 工质接受燃料释放出来的热能通常是在热机外部的专门设备——蒸汽鍋炉中进行的, 燃料在鍋炉炉膛内与外来空气混合燃燒, 但燃燒产物并不进入发动机, 而从鍋炉的烟囱排出。因此, 亦有人称这种发动机(蒸汽机和蒸汽輪机)为

① 近几十年发展起来的热机——喷气发动机和火箭发动机是燃气发动机的一种, 但其能量轉換的方式, 不是活塞式, 也不是叶輪式, 而是依靠气体喷射时产生反作用力推进的一种特殊的机械装置, 通称喷射式推进机。

② 蒸气发动机这一术语一般泛指以任何物质的蒸气为工质的原动机。本书只討論以水蒸气为工质的原动机(蒸汽机和蒸汽輪机), 故书名名为“蒸汽发动机”。

外燃机^①。

活塞式热机的主要作功部件为气缸(或汽缸)和活塞。在通常情况下,活塞在气缸内依靠压力势能的改变作往复运动,如需变成迴轉运动,应有曲柄連杆机构,例如常見的蒸汽机和柴油机等。在特殊情况下,活塞式热机也可設計成活塞在气缸内作旋轉运动的型式。

叶輪式热机的主要作功部件是气缸和叶輪,叶輪受工质动能改变的作用在缸内迴轉。例如蒸汽輪机和燃气輪机^②。

热机是最重要的原动力机,它能有效地把热能轉变为机械功。热机中的蒸汽发动机,当前对人类提供了最多的原动力。

蒸汽发动机在国民經济中的重要性

要組織現代工农业生产过程,不断提高劳动生产率,必須以大量的技术装备和經濟性很高的原动力作保证。馬克思在分析現代工业的特点和条件时說过:“大工业必須掌握着它的最特別的生产資料,即机器本身;必須用机器生产机器。……以机器建造机器的最必要的生产条件是:有一种发动机,可供給动力至任何程度,同时又完全受人控制。这个条件,在蒸汽机上面,是已經具备了。”^③ 列宁也曾經指出:“劳动生

① 热机的基本热源是燃料发热量(特殊情况下也可用太阳能和地热等为热源)。虽然外燃机这一术语在工程上的应用并不普遍,但由內燃机和外燃机这种容易理解的概念可以清楚地了解到:当衡量以燃料消耗为基础的效果时(例如求单位功的燃料消耗率),在內燃机中,可以直接由机器本身中求出。而对外燃机(蒸汽发动机),由发动机本身只能求得汽耗率(公式1—8)和热耗率(§1—5 注文),不能求出最基本的热經济指标燃料消耗率。如果欲求出外燃机的燃料消耗率,必須把机器外部产生蒸汽的鍋炉设备及其損失也一并考虑。故在全面分析蒸汽发动机的热經济指标时,必須把整套蒸汽动力装置(包括鍋炉、水泵等)都考虑在內(§1—5)。

本书第一章总論,即从热能有效利用的总体观点出发,全面論述蒸汽发动机及其装置的热功关系和經济指标。

② 輪机亦名透平,透平为“Turbine”一詞的譯音。例如蒸汽輪机亦称“蒸汽透平。”叶輪式热机某些书上亦名“透平式热机”。

③ 馬克思:《資本論》第一卷,人民出版社,1956年版,第463頁。

产率，归根到底是保证新社会制度胜利的最重要最主要的东西。……资本主义可以被彻底战胜，而且一定会被彻底战胜，因为社会主义能造成新的高得多的劳动生产率。”^① 马克思又说过：“超越于劳动者个人需要的农业劳动生产率，是一切社会的基础。”^② 毛泽东主席讲到：“中国只有在社会主义经济制度方面彻底地完成社会主义改造，又在技术方面，在一切能够使用机器操作的部门和地方，通通使用机器操作，才能使社会经济面貌全部改观。”^③ 所有这些，都直接和间接地说明动力在推动工农业生产和巩固新的社会制度方面的重要性。

不论在工业和农业生产中，电力是现阶段生产发展水平上的最优越和最方便的动力。一个国家年用电量的多少能够反映工农业的生产水平和现代化的程度，所以年电力生产量是国民经济的最重要生产指标之一。在自然界存在的电能是很多的（如雷电），但还没有有效办法加以利用，而现在所有国家使用的电力都是由其他能量转变来的，主要是依靠热能（通过热机—发电机组）和水能（通过水轮机—发电机组）转变来的。1960年全世界共发出电力22312亿度^④，全部都由热力发电厂和水力发电厂中的动力机发出，其中靠汽轮机发出的电量约占总发电量的70%。1958年，我国总发电设备容量——热力和水力——共为692万千瓦，其中蒸汽发电设备是500多万千瓦，约占总数的80%。由此可见，在和国家工农业电气化密切相关的电力工业中，蒸汽发动机有最大的作用。

由于水力发动机受地区条件的限制，水陆空交通运输和工农业机械（如拖拉机、推土机、起重机等）所需的大量动力，几乎完全由热力发动机供应。蒸汽发动机在轻便和机动性方面远不及内燃机，因此

① 《伟大的创举》。《列宁全集》第29卷，人民出版社，第388页。

② 马克思：《资本论》第三卷，人民出版社，1956年版，第1025页。

③ 毛泽东：《关于农业合作化问题》，人民出版社，1955年版，第33页。

④ 《国外动力》，№10, 1962。

在汽車、拖拉机、航空、中小型艇舰等都应用內燃机。但是內燃机用的是液体和气体燃料，蒸汽发动机可用固体燃料(煤或其他当地燃料)，来源較广。蒸汽发动机中的蒸汽机，尚有构造简单、坚固耐用、起动力巨大、反轉方便、維修容易等优点，不但常作为工业企业的小型固定动力机，且在铁道機車和船舶上也大量采用。蒸汽动力中的鍋駝机(是蒸汽机和鍋炉組合得很緊湊的动力装置)，受到广大农村人民公社和边远城鎮的欢迎。很明显，蒸汽机在发展我国国民經济和农业技术改造中(特别是小型发电、农用动力和固定排灌站)，将發揮它应有的作用。

蒸汽发动机可以实现热化(§ 1-7)，所以它对同时需要电能和热能的工业企业特别适用。

§ 1-2. 蒸汽发动机的发展簡史

自古以来，人类为了減輕沉重的体力劳动和提高劳动生产率，就設法利用自然界中蘊藏的极其丰富的能量。例如热能(一般指有机燃料化学能)、水能、風能和太阳能等(近代还有原子能)。恩格斯曾經高度的评价热能的利用及其轉化对人类社会发展的意义，他曾指出：“……人們只是在学会了摩擦取火以后，才第一次使某种无生命的自然力替自己服务。”^①他同时也指出：“然而摩擦取火的过程还是片面的。机械运动通过这个过程轉化为热。为了完成这个过程，必須再反过来——热轉化为机械运动。”^②人类社会是按着自己的历史規律发展，热能大量有效的轉化为机械运动，才是近代二百多年的事。

人类的祖先根据和自然界斗争的經驗，最先造出来的是一些简单的水力机械，用以代替人力工作。在历史上很长的一个时期(几千年)，利用水力的水車占統治地位，直到十八世紀才被蒸汽机所代替。

① 恩格斯：《自然辯证法》，人民出版社，1959年版，第83頁。

② 恩格斯：《自然辯证法》，人民出版社，1959年版，第84頁。

我們的祖先,在利用自然界能量方面有极其光荣的历史。根据《后汉书》卷六十一《杜詩傳》記載,建武七年(公元31年)已利用水力拉風箱。我国古代偉大的天文学家張衡(公元78—139年),就已經利用水力作为轉动天文仪器的原动力。在公元1000年左右,我国已发明了走馬灯,巧妙地利用热力产生迴轉运动,是近代叶輪或迴轉式热机的一种雛型^①。

人类在很长的历史时期內之所以应用水力,主要是因为当时的生产力情况下,动力已經得到滿足。人們用水力磨米,冶炼場用水力拉風箱,矿井用水力机械抽水等。在封建制度下,虽然作坊和手工业工場也在逐渐发展,但利用水車和兽力仍能滿足简单机械的驱动,而对馬力較大和无地区条件限制的动力机需要并不迫切。随着生产力和采矿冶炼业的发展,水力受地区条件限制这一主要缺点日益突出。例如,对于較大的冶金业,在同一地点,矿石、燃料、水力三者具备的条件是很少的,如果迁就水力,从远处运来矿石和燃料势必造成浪费,使产品成本提高。更严重的是在富矿附近,如无水力,矿井的水不能排出而无法开采。在这种迫切的要求下,曾有人急得从远处运水来产生动力,但很多人考虑到,如果能用燃料来产生动力,也許比从远处运水来产生动力經濟和方便,于是发明家帕宾(Papin, 1681, 法)、薩佛勒(Savery, 1699, 英)及紐苛門(Newcomen, 1711, 英)等逐漸創制了适合矿井提水的蒸汽发动机(有鍋炉、汽缸、燃燒装置、起重提水設備),矿井提水的問題暂时得到解决,但这种机器不能用于推动其他工作机械,如鼓風、鋸木、鍛铁等,而所有机械只好仍用水力^②。

欧洲自文艺复兴以后,生产力得到加速发展,不但矿冶业勃兴,而且生产工具也不断扩大和复杂化,并发展了机器。使手工业变为机器工业,作坊变为工厂,终于在十八世紀发生了工业革命(由手工业作坊

① 这些資料詳見参考书刊[1]。

② 見参考书刊[21]。

变为用大机器生产的资本主义企业)。这时工厂对动力机提出了新的迫切要求,除要求这种动力机不像水力机受地区和季节水流的限制外,还要求馬力大,不但可以抽水,而且能带动各种工厂机械,換句話說,即要求发明万能的动力机。在这种力量推动下(特别是当时英国紡織工厂勃兴),俄国波尔宗諾夫(Ползунов, 1765)和英国瓦特(Watt, 1776 和 1784)在创造性地总结矿山提水用的蒸汽发动机的基础上,发明了蒸汽机^①。蒸汽机的发明,实现了热能大量有效地轉化为机械功的过程。蒸汽机在各种各样的工厂中装置起来,完全替代了水力机,且迅速成功地应用在机車和船舶上,推动了工业和运输业的发展。例如,十九世紀中叶,蒸汽机车总装置容量超过工厂的装置容量,十九世紀末,船上装置的容量已超过水陆装置总容量的一半以上。

蒸汽机的发明,不但完成了十八世紀的工业革命,而且对下列各方面产生极大的影响:

(1)蒸汽机的运行和制造,迫使燃料开采和金属工业扩大,同时对金属加工工业提出更高的要求,促进了机器制造业的发展和制造技术的进步。

(2)对蒸汽机效率的深入研究,形成了一門新的科学——热力学。由于刚刚出現的蒸汽机效率很低,第一台瓦特机,以燃料发热量为基础的总效率还不到2%。人們不断实践、改进、研究,寻求提高热效率的途径,终于在蒸汽机运转了半个多世紀以后,由卡諾(Carnot, 1824)、焦耳(Joule, 1840)、迈耶(Mayer, 1842)、克劳修斯(Clausius, 1850)等学者逐步建立了系統和完整的热工理論——热力学。反过来,热力学又大大推动了热能动力事业的高漲,并为創造新型的热机准备了条件。

(3)根据蒸汽机生产中的經驗和热力学理論的指导,十九世紀末期,由鄂图(Otto, 1878, 德)、笛塞尔(Diesel, 1893, 德)、科斯托維奇

^① 波尔宗諾夫和瓦特发明的蒸汽机詳图,見参考书刊[9]第9頁,第12頁。波氏机的簡图見本书图2-1。

(Костович, 1880, 俄)等发明了輕便和机动性很大的內燃机, 促使交通運輸事业进一步現代化。

随着人們对电的知識的掌握, 工业生产的进一步集中和扩大, 在十九世紀后期, 往复工作的蒸汽机, 在某些工业部門(特別在电力工业部門)的缺点突出了。例如: 轉速不高, 不能直接带动发电机; 容量太小, 不能發揮集中发电的优点; 以及效率低等。在这种客观的要求推动下, 以及有了热力学理論的指导, 同时, 对工质——蒸汽的研究日益深入, 已經比較确切地掌握蒸汽各种性质, 于是, 发明家拉伐尔(Laval, 1883, 瑞典)和帕生斯(Parsons, 1884)分別創造了冲击式和反击式汽輪机。这种迴轉式热机的出現, 大大加强了电力工业, 并加速了工农业生产过程的电气化, 且使动力机械制造工业进入一个新的阶段。

蒸汽发动机的发展史, 充分证明了生产力的发展和科学技术相互促进的密切关系, 同时也是实践和理論密切結合的典型范例。从热力学的形成中可以看出, 理論是由实践中来的, 但是在出現正确的理論以后, 必然反过来成为指导实践的有力工具和武器。

从蒸汽发动机的出現到現在, 它的成就已經有很高的水平, 而且还在繼續向前发展。蒸汽机的单机功率曾到过两万馬力^①。目前, 蒸汽机裝置的总效率已由十八世紀的不到 2% 提高到 25%。現代高速蒸汽机的最高轉速为 1500 轉/分。由于发电事业的需要, 汽輪机的发展很快, 1956 年世界上最大的机組为 26 万千瓦, 1961 年已有四台功率各为 50 万千瓦的机組在运行, 近年的单机功率有可能突破 100 万千瓦^②。蒸汽的压力也由最初的几个大气压提高到現在的几百个大气压。

§ 1-3. 蒸汽动力装置的基本热力循环(朗肯循环)

在前面的热机分类中已經指出: 蒸汽发动机的工质(蒸汽)接受燃

① “Большая Советская Энциклопедия”, том 32, второе издание.

② «国外动力», №10, 1962.

料釋放出来的热量,是在热机外部的专门設備——蒸汽鍋炉中进行的。为此,要考察、研究蒸汽发动机工质所經歷的整个热力变化过程——循环时,不仅要考虑发动机本身,而且必須把与工质状态变化过程有关的所有設備都考虑在內,这些設備的总合称之为蒸汽动力装置。

蒸汽动力装置的热力循环很多,但是所有实用上的循环,都是在基本热力循环——朗肯循环——的基础上发展起来的。現在就来分析这个循环。

图 1-1 是一个蒸汽动力装置設備簡图。为了看清工质的状态变化

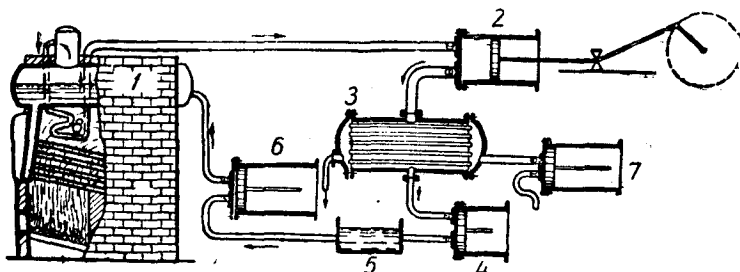


图 1-1. 蒸汽动力装置設備簡图:

1—鍋炉; 2—蒸汽机(也可以是汽輪机); 3—凝汽器; 4—凝結水泵;
5—給水箱; 6—給水泵; 7—循环水泵; 8—过热器。

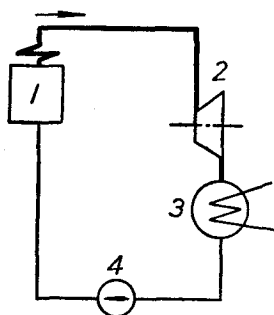


图 1-2. 蒸汽动力装置設備系統图:
1—鍋炉; 2—蒸汽发动机(蒸汽机或
汽輪机); 3—凝汽器; 4—給水泵。

过程, 通常用符号来表示与工质状态变化有关的設備, 突出工质流动路綫。如将图 1-1 轉化成热力設備符号系統图, 則如图 1-2 所示。

水在鍋炉 1 中吸热变成高温高压蒸汽; 蒸汽进入蒸汽发动机 2 (蒸汽机或者蒸汽輪机) 膨胀作功后的低压蒸汽进入凝汽器 3, 放出热量(被冷却水吸收)凝結成水; 水由給水泵 4 提高压力后送入鍋炉, 如此不断循环。由这

套设备组成的这个循环,即称朗肯循环^①。

按照热力学的分析方法,把实际过程理想化,即:假定所有过程没有不可逆损失,而且认为蒸汽发动机的膨胀和水泵的压缩都是按照绝热过程进行的,于是,朗肯循环各过程的 $T-s$ 图,可如图 1-3 表示。图中:

4-1——水在锅炉内等压加热、汽化和蒸汽过热过程;

1-2——蒸汽在蒸汽发动机内的绝热膨胀过程;

2-3——蒸汽发动机排汽在凝汽器内的等压凝结过程;

3-4——水在给水泵内绝热压缩过程。

朗肯循环中,工质在锅炉中得到的热量,相当于图 1-3 中 $41nm4$ 的面积, T 等于:

$$q_1 = i_1 - i_4 \text{ 大卡/公斤。} \quad (1-1)$$

式中 i_1 ——锅炉出口(即蒸汽发动机入口)处每公斤蒸汽的焓,大卡/公斤,可根据压力 p_1 和温度 t_1 在蒸汽图表上查得;

i_4 ——给水泵出口处水的焓,大卡/公斤。

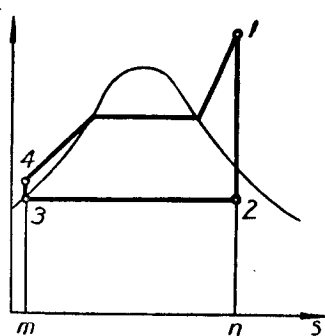


图 1-3. 朗肯循环的 $T-s$ 图。

① 朗肯循环设备(图 1-2)中的凝汽器不是必要的。为了使蒸汽动力装置的设备简单,绝热膨胀后的低压蒸汽也可以排向大气,由给水泵从其他水源压水进入锅炉。从热力学的观点看,没有凝汽器,工质仍可完成循环,因为蒸汽排入大气(自然界),在自然界中又变为水。例如:蒸汽机车,骆驼机等,为了去掉庞大的凝汽设备,就是将低压蒸汽排入大气而完成循环的。但在中、大型的固定蒸汽动力装置(例如:发电厂)中,装设凝汽器是很有利的,它可以提高热变功的效率。装设凝汽器的主要目的有二: 1. 造成低压环境,使蒸汽发动机多做功; 2. 保留工质(水)。

② 本书以通用热工符号 i, s, u, v, l, q 等, 分别表示一公斤工质的焓、熵、内能、比容、功量、热量等。

蒸汽在蒸汽发动机內絕热膨胀所作的功, 根据热力学稳定流动能量方程式, 等于:

$$Al_{1-2} = i_1 - i_2 \text{ 大卡/公斤。} \quad (1-2)$$

式中 i_2 ——蒸汽在蒸汽发动机內絕热(等熵)膨胀后排汽的焓, 大卡/公斤, 可由蒸汽图表查得;

l_{1-2} ——每公斤蒸汽絕热膨胀所作出的功;

A ——功的热当量, 等于 $\frac{1}{427}$ 。

工质在凝汽器中放出的热量, 相当于图 1-3 中 $n23mn$ 的面积, 等于:

$$q_2 = i_2 - i_3 \text{ 大卡/公斤。} \quad (1-3)$$

式中 i_3 ——凝結水的焓, 也就是在排汽压力 p_2 下的饱和水的焓 i_2' , 大卡/公斤^①。

給水泵消耗的絕热压缩功, 亦可根据稳定流动能量方程式求得, 等于:

$$Al_{3-4} = i_4 - i_3 \text{ 大卡/公斤。} \quad (1-4)$$

上式中, 由于水的压缩性极小, 通常可以认为水的压缩前后比容 v 不变, 于是絕热压缩功 $Al_{3-4} = Av(p_3 - p_4)$ 。这项压缩功, 即使压差相当大, 但由于水的比容 v 小, 折合成大卡仍极微小。因此, 一般計算时, 給水泵消耗功可以忽略, 并假定 $Al_{3-4} = 0$, 或 $i_4 = i_3$ ^②。

整个朗肯循环所得的淨功是蒸汽发动机作功和給水泵耗功的差值:

① 蒸汽图表上, 通常以 i' 表示飽和水的焓, i'' 表示飽和蒸汽的焓。

② 由于水的压缩性极小, 給水泵消耗的絕热压缩功 $Av(p_4 - p_3)$, 在近似計算时可以忽略, 即 $i_4 = i_3$ 。根据焓的定义: $i = u + Avp$, 所以 $i_4 - i_3 = (u_4 - u_3) + Av(p_4 - p_3)$, 今 $i_4 = i_3$, $Av(p_4 - p_3) = 0$; 于是 $(u_4 - u_3) = 0$, $u_4 = u_3$ 。由此可见, 水絕热压缩时內能也几乎不变, 故可以认为温度改变也很微小。这样, 在 $T-s$ 图中(图 1-3), s 和 4 两点实际上可以认为重合, 某些书上就是这样处理的。

$$\begin{aligned}
 Al_0 &= Al_{1-2} - Al_{3-4} = i_1 - i_2 + i_3 - i_4 = (i_1 - i_4) - (i_2 - i_3) = \\
 &= q_1 - q_2 \text{ 大卡/公斤。}
 \end{aligned}
 \quad (1-5)$$

这个净功相当于图 1-3 中面积 1-2-3-4-1。

朗肯循环热转变为功的效果——即朗肯循环热效率为：

$$\eta_t = \frac{Al_0}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{i_1 - i_2 + i_3 - i_4}{i_1 - i_4} \quad (1-6)$$

近似计算时，完全可以认为： $i_1 = i_3$, $q_1 = i_1 - i_3$, $Al_0 = i_1 - i_2$, 于是

$$\eta_t = \frac{Al_0}{q_1} = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_3} = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_2} \quad (1-6')$$

上式中的所有焓值，都可由一般蒸汽图表中准确地查出。

§ 1-4. 蒸汽发动机的经济指标

凡能表示热机某一方面一定经济效果的，就可称为经济指标^①。热机有多种经济指标，而最重要的是热经济指标，它表示热转变为功的比率或热工设备的热能有效利用的程度。例如朗肯循环热效率就是一种热经济指标。还有一种指标，并没有输出量和输入量之比的意义。例如表示发动机作功能力大小的功率，以及表示发动机本身重量的金属消耗率。但是这类指标能反映发动机某个方面的品质，和其它发动机之间很有比较的价值，因此也归入经济指标的范围。

分析讨论热机的经济指标，首先要明确输出量(效益)和输入量(耗费)两项的内容，而且应分清研究问题的范围。例如，如果把图 1-2 所示整个蒸汽动力装置拿来研究，则所得的结果是指整个蒸汽动力装置的指标。如果将图 1-2 中的蒸汽发动机部分单独划出来研究，就可得到蒸汽发动机的经济指标。现将蒸汽发动机的主要经济指标分析

^① 一般情况下，热机的经济指标是指输出量(效益)和输入量(耗费)之比，有时也称效率，常用符号 η 表示， $(1-\eta)$ 即反映损失率的大小。