



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

高等内燃机学

唐开元 欧阳光耀 编著

国家级规划教材

作者权威,学术领先

面向21世纪教学改革

全国优秀出版社倾力打造



国防工业出版社

National Defense Industry Press

TK401
TKY

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

高等内燃机学

唐开元 欧阳光耀 编著



国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材,分为基础理论、计算机仿真及电子控制管理系统、人工智能及智能控制技术的应用等三部分,共8章。内容包括热力学及化学反应动力学、计算流体力学、计算机数值模拟技术在内燃机性能研究中的应用、有限元方法在内燃机结构分析中的应用、电子管理系统、人工智能技术、软计算方法、控制理论等现代新技术在内燃机工程中的应用。

本书是在内燃机基本结构和原理的基础上,结合当前科学技术及相关学科发展,对内燃机性能及结构的改进研究提供新的思路和方法。

本书可作为相关专业研究生教材,也可作为科研人员、专业工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

高等内燃机学 / 唐开元,欧阳光耀编著. —北京:国防
工业出版社, 2008. 8
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978 - 7 - 118 - 05747 - 8

I. 高... II. ①唐...②欧... III. 内燃机—高等学
校—教材 IV. TK401

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 071401 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 27½ 字数 634 千字
2008 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 56.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

序

内燃机经历了 100 多年的发展,并且早已成为性能优良、技术成熟、在国民经济各个领域中得到广泛应用的热动力机械。但是,由于越来越严重的世界性的石化能源短缺,人类生存环境的恶化以及其他新型动力机械(如燃料电池等)的竞争,使内燃机从以往只要求特定工况性能(包括动力性能、经济性能、排放性能、噪声及操纵性能等)优化转到对整个运行范围内的各个工况点的性能均优化的要求;从单纯追求延长大修期寿命转到对整个使用期内的全寿命检测、故障诊断和维修预测;要求内燃机从过去以经验设计为主的时代过渡到以近代新学科和新技术为基础的计算机辅助设计及制造上来。经过将近几十年的努力,可以说内燃机已基本上实现了上述要求,成为一种名副其实的机电一体化的高科技产品。

《高等内燃机学》一书就是为了全面反映上述内燃机科技划时代的进步而编著的。全书有 3 个重点,一是以计算流体力学为中心,介绍了内燃机进排气管道内的一维不定常流动计算和气缸内的三维流动计算,介绍了内燃机工作过程的数值模拟和燃烧、排放的模拟计算,这是当前广泛应用的各种内燃机工作过程模拟计算程序编制的基础;二是以电控高压共轨燃油喷射系统为核心,介绍了现代柴油机的电子控制系统的研发,其中重点讨论了大功率电控柴油机的特点,介绍了智能化柴油机的概念,这显然是当代大功率柴油机的主要发展方向;三是由于内燃机中的控制问题,大多是具有系统组成结构复杂、非线性、强耦合特点的多参数、多约束、多目标的优化问题。将智能控制和其他先进控制理论和相应的软计算方法应用于内燃机的控制上。经过不断的努力,目前已在燃烧过程的优化控制、动力系统的控制和自动化以及发动机故障诊断及状态监测等方面取得长足进展,并显示出它对内燃机今后发展的巨大作用,为此在本书中用了较大的篇幅,系统介绍了人工智能技术和近代先进控制技术以及相应的算法在内燃机中的应用,并列举了一些成功的实例,这些内容可以作为我国年轻的内燃机科技人员掌握上述先进科学技术的入门知识。总之,由于本书内容的先进性和前沿性,它必将对提升我国内燃机科技人员的总体学术水准起到积极的推动作用,从而对提高内燃机产品质量赶超世界先进水平产生显著的经济和社会效益。

本书作者唐开元教授是我国著名的内燃机学者,他在总结长期从事柴油机理论教学和科学研究成果的基础上,又参考了大量的专著和文献资料,不怕辛劳,努力著述以启迪后人的精神令人敬佩。本书的另一作者欧阳光耀教授,是我国内燃机学科的后起之秀,作为唐开元教授的学生和合作者,两代人合作著述,相互支持,利衷共济,薪火相传,也为我

们树立了榜样。

本书的初稿完成于 2005 年,经过数年的努力终于取得结果。本书被列入国家“十一五”教材出版规划,大家都感到十分鼓舞,我也乐以为序,向各位读者推荐。

西安交通大学教授
中国内燃机学会名誉理事长兼专家咨询委员会主席

蒋小明

2007 年 7 月 1 日

前 言

内燃机在国民经济各个领域中都有广泛的用途。汽油机是汽车及轻型载重车的主要动力,柴油机以其功率覆盖面大,热效率高,可靠性好等特点,被广泛用于军民用船舶、电站、机车、军用特种车辆、重型载重车辆,以至农业机具作为原动机。

柴油机问世至今已有 100 余年的历史,在 20 世纪中技术上已发展得相当成熟,进入 21 世纪以后,柴油机的发展面临着能源短缺及环保规范严格限制的挑战,对柴油机的经济性及排放性提出了更高的要求。

柴油机是一种热力发动机,其性能主要取决于燃油喷射及空气的供给和流动形态,众多的影响因素之间相互关系复杂,且具有很强的非线性特征。同时,柴油机的运行工况和环境条件的变化也对其性能产生很大的影响,呈现出很强的时变性特征。在高功率密度的情况下,柴油机的整体及部件的结构强度是提高其工作可靠性的基础,状态监测及故障诊断则是有效的技术保障手段。传统的设计、研究方法及管理手段已难以满足要求。

随着科学技术的进步,近年来与柴油机相关的基础理论学科,如工程热力学、计算流体力学、传热学,技术应用学科,如计算机技术、人工智能技术、控制技术、优化方法等,都有了巨大的发展,理论上日趋成熟并已进入实用阶段。柴油机在这些学科的支持下,对其性能的提高和改善提供了有效的研究手段和试验、计算工具,并为其发展开辟了广阔的途径。目前已较普遍采用的技术有:采用部件功能模块设计思想,利用计算机辅助设计、计算机仿真技术及有限元法、有限差分法、有限容积法等数值计算方法,可对柴油机部件的结构造型、结构强度、工质流动形态、混合燃烧过程等进行精确的计算分析,以实现柴油机的整体优化设计;采用计算机控制的电子—液力机构替代机械传动机构,将燃油喷射系统及气门传动系统从刚性控制改变为柔性控制,以实现在各种工况及环境条件下柴油机运行性能的优化控制;采用模糊理论、人工神经网络、遗传算法等软计算方法及智能控制技术,可以实现对具有非线性及时变性特征的柴油机实施更为精确和实时的优化控制;采用电子管理系统及人工智能专家系统,可以实现对柴油机的状态监测、故障诊断及维修预测等优化管理,从而使柴油机具有应对挑战的强大适应能力和进一步提高智能化水平的巨大发展潜力。

目前,相关学科已有一些专著出版,有关柴油机应用有关新技术的学位论文及专题研究报告也不断出现,但作为系统完整的高层次教学及参考用书尚未见到。现根据柴油机技术发展的趋势和相关学科的发展水平,以及作者长期教学经验及科研成果的积累,并在

对有关学科的专著和专题研究报告进行了泛读精选和消化吸收的基础上,编写出此书。本书以基础理论、计算机仿真及电子控制管理系统、人工智能及智能控制为基线,采用模块式结构,各章内容相对独立完整,且各章之间保持有序联系。全书共分8章内容,第1、2章为基础理论部分,主要内容有工程热力学及化学反应动力学,计算流体动力学;第3、4、5章为计算机仿真技术及电子控制技术在内燃机工程中的应用;第6、7、8章为人工智能、专家系统、软计算方法(模糊逻辑、人工神经网络、遗传算法)、智能控制等在内燃机工程中的应用。

本书可供相关院校高年级学生选修、研究生教学及工程技术人员参考。由于编著者水平有限,错误及不足之处难免,敬请读者批评指正。

感谢西安交通大学蒋德明教授、上海交通大学顾宏中教授、华中科技大学刘永长教授、武汉理工大学朱国伟教授等对本书进行精心审阅,并给予热情的鼓励和指导;感谢国防工业出版社的大力支持。在本书编写过程中,曾参阅和引用了许多国内外专家学者的学术论文和著作,在编写和出版过程中得到许多同志的热情帮助,在此一并表示衷心感谢。

编著者
2008年2月

目 录

第1章 热力学及化学反应动力学	1
1.1 概论	1
1.2 简单热力学体系的特性	2
1.2.1 定义	2
1.2.2 热力学特性	3
1.3 热力学第一定律	3
1.3.1 闭合变化中的功和热量的关系——热功当量	3
1.3.2 不闭合变化中的功和热量的关系	3
1.3.3 热力学能	4
1.3.4 几点说明	4
1.4 热力学第二定律	4
1.4.1 热力学第二定律的表述	5
1.4.2 卡诺循环与卡诺定理	5
1.4.3 熵	6
1.5 可用能(焔)	7
1.5.1 焔的定义	7
1.5.2 炆	8
1.5.3 能量分析与焔分析	8
1.5.4 物理焔和化学焔	9
1.5.5 焔平衡和焔损失	12
1.5.6 柴油机循环的可用能平衡计算	19
1.6 工作介质(工质)	21
1.6.1 理想物质	21
1.6.2 状态方程式	23
1.6.3 理想气体的混合物	25
1.6.4 热力学第一定律应用于化学反应——无分解反应	27
1.6.5 热力学第二定律应用于化学反应——有分解反应	30
1.6.6 可变成分的气体混合物热力学	33
1.6.7 化学反应热力学	38
1.6.8 内燃机燃烧产物的化学平衡计算	39
1.7 内燃机工作循环	43
1.7.1 内燃机的理想循环	43

1.7.2 内燃机循环的有限时间热力学分析·····	45
1.8 化学反应动力学·····	51
1.8.1 基本概念·····	51
1.8.2 化学反应速度·····	51
1.8.3 链反应·····	54
1.8.4 链反应的自燃理论·····	55
1.8.5 碳氢燃料燃烧过程的化学反应动力学模型·····	56
参考文献·····	59
第2章 计算流体力学及其在内燃机工程中的应用 ·····	60
2.1 概论·····	60
2.2 流动问题的数值模拟·····	62
2.2.1 流体动力学基本方程、方程的解及定解条件·····	65
2.2.2 湍流模型·····	70
2.2.3 两相流体动力模型·····	77
2.2.4 边界条件·····	82
2.2.5 离散方法·····	82
2.2.6 网格生成技术·····	87
2.2.7 数值计算方法·····	90
2.3 气体流动的数值模拟·····	95
2.3.1 特征线法·····	96
2.3.2 一维不定常等熵流动·····	97
2.3.3 等熵流动特征方程的数值解法·····	100
2.4 计算软件简介·····	101
2.5 计算实例·····	103
参考文献·····	113
第3章 计算机数值模拟技术在内燃机性能研究中的应用 ·····	114
3.1 概论·····	114
3.2 数学模型·····	115
3.3 内燃机工作过程数值模拟·····	116
3.3.1 工作过程计算的用途·····	116
3.3.2 工作过程数值计算的数学模型·····	118
3.3.3 四冲程涡轮增压柴油机工作循环的模拟计算·····	118
3.4 柴油机燃烧过程模拟计算·····	137
3.4.1 概述·····	137
3.4.2 准维燃烧模型及计算方法·····	138
3.4.3 排放物生成模型及计算方法·····	152
3.4.4 柴油机燃烧过程的多维数值计算模型·····	154
3.5 柴油机瞬态特性的数值模拟·····	160
3.5.1 概述·····	160

3.5.2 柴油机瞬态性能的容积法模型	161
参考文献	172
第4章 有限元法在柴油机结构分析中的应用	174
4.1 概述	174
4.2 有限元法的基本原理	176
4.2.1 应力、应变问题	176
4.2.2 温度场问题	179
4.2.3 热应力计算	179
4.2.4 有限元法的基本步骤	179
4.3 有限元法分析实例	180
4.3.1 某型船用主机气缸台肩镶台肩套变形分析	180
4.3.2 柴油机曲轴断裂预报技术	183
4.3.3 基于有限元法和 FE-SAFE 的柴油机排烟管振动下的疲劳寿命	190
4.3.4 不可压缩橡胶体的静态性能分析	199
4.3.5 液氧罐冲击响应的安全性评估研究	203
4.3.6 CFD 在柴油机连杆轴承穴蚀分析和修理中的运用	206
参考文献	213
第5章 柴油机的电子控制技术	214
5.1 概论	214
5.1.1 内燃机发展面临的挑战	214
5.1.2 柴油机有害排放物的形成及治理	215
5.2 柴油机的电控燃油喷射系统	226
5.2.1 现代柴油机燃油喷射系统的基本要求	226
5.2.2 燃油喷射系统工作特性参数	226
5.2.3 电控燃油喷射系统的发展过程和现状	230
5.2.4 电控燃油喷射系统的工作原理及基本构成	231
5.2.5 电控喷油系统的典型结构	232
5.3 电控高压共轨式燃油喷射系统	239
5.3.1 共轨系统与传统的泵—管—嘴系统的比较	239
5.3.2 高压共轨系统对柴油机性能的影响	241
5.3.3 高压共轨系统主要构成部件的结构、工作原理和设计	242
5.3.4 高压共轨燃油喷射系统的仿真研究	257
5.3.5 高压共轨燃油喷射系统的控制与调节	275
5.3.6 柴油机工况管理模块及控制器设计原理	279
5.3.7 电控柴油机的标定技术	288
5.3.8 高压共轨系统的发展	289
5.4 电子控制柴油机气门系统	296
5.4.1 电控可变气门驱动机构的基本结构	297
5.4.2 电控可变气门系统启、闭参数可控性研究	298

5.4.3 电控可变气门系统的控制策略及其实现	300
5.5 大功率电控柴油机的特点及发展	303
5.5.1 特点	303
5.5.2 大功率电控柴油机实例	305
参考文献	315
第6章 人工智能技术及其在内燃机工程中的应用	317
6.1 概论	317
6.1.1 人工智能的计算机模拟	318
6.1.2 人工智能的研究领域	320
6.1.3 人工智能语言	322
6.2 知识及其表示	323
6.2.1 知识及其分类	323
6.2.2 知识的表示方法	323
6.2.3 知识获取(机器学习)	324
6.3 专家系统	325
6.3.1 专家系统的特点及优点	325
6.3.2 产生式系统	326
6.3.3 推理技术	328
6.3.4 专家系统的结构	330
6.3.5 专家系统的建造步骤	331
6.3.6 柴油机故障诊断专家系统	331
参考文献	333
第7章 软计算方法及其在内燃机工程中的应用	334
7.1 概论	334
7.2 模糊理论	334
7.2.1 模糊集合论	335
7.2.2 模糊集合的运算	338
7.2.3 模糊关系和关系矩阵	340
7.2.4 模糊变换	341
7.2.5 模糊决策	342
7.2.6 模糊推理	343
7.2.7 模糊理论在内燃机工程中的应用	345
7.3 人工神经网络	349
7.3.1 神经元模型	350
7.3.2 人工神经网络	351
7.3.3 计算机与大脑	353
7.3.4 神经网络的学习	354
7.3.5 组织神经网络的方法	356
7.3.6 前向传播多层神经网络	363

7.3.7	径向基函数神经网络	366
7.3.8	Hopfield 网络	371
7.3.9	神经网络在内燃机性能研究中的应用	374
7.4	遗传算法	379
7.4.1	遗传算法的基本步骤	379
7.4.2	遗传算法的特点	382
7.4.3	应用遗传算法时几个需要研究的问题	383
7.4.4	遗传算法在内燃机工程中的应用	383
7.5	智能计算方法的融合	385
7.5.1	模糊系统与神经网络	385
7.5.2	遗传算法用于神经网络	386
7.5.3	应用实例	387
	参考文献	393
第 8 章	控制理论及在内燃机工程中的应用	395
8.1	概述	395
8.2	控制系统的组成和分类	396
8.3	控制系统的性能指标	401
8.4	经典控制的基本理论和方法	402
8.5	现代控制理论和方法	409
8.6	智能控制系统的基本理论和方法	410
8.7	智能控制在内燃机工程中的应用	416
8.8	柴油机共轨式燃油喷射系统智能控制器的设计研究	425
	参考文献	428

第1章 热力学及化学反应动力学

1.1 概 论

热力学是研究力的现象和热的现象两者之间相互关系的科学。热力学是热现象的宏观理论,采用的方法是把系统中大量的微观质点作为一个整体,以研究其表现出来的各种性质。因此,热力学并不以说明物体状态变更的内部机理为其任务,热力学的一些定律是用从经过实验所确定的一些宏观量之间的关系直接推导出一些宏观量之间的其他关系。热力学与分子运动学之间的区别在于它们的出发点不同和所运用的方法亦不相同。分子运动论的观点认为物质是由大量的微小质点(分子、原子)所组成,把从实验直接观察到的物体性质(压强、温度等)理解为物体内部诸质点作用的结果,分子运动理论运用统计的方法,它不关心个别质点的运动而只关心那些表征大量质点集体运动的平均数量。热力学的研究则不考虑到分子和原子,不依赖于统计力学,不需要作出各种简化的假设,因而一般是精确和可靠的。热力学的缺点在于它没有深入到现象的运动机理中去。

工程热力学研究热和功相互变换的一些法则,以及这些变换所赖以发生的一些物理过程。此外,在工程热力学中也研究了作为工质的气体和蒸汽的物理性质。工程热力学确立了热力学的一些函数、量和参数(热力学特性)之间的解析关系。根据工程热力学的一些定律,奠定了热机的基本原理,给出了研究热力循环的热力学方法,成为热动力机械的重要理论基础。

工程热力学中的理想循环是以理想气体作为工质,由可逆的热力过程在热源加热及向冷源放热等条件下所组成的封闭循环,它是实际热力发动机工作循环的理论模型,通过理想循环的分析可以得到热功转换的最高效率和对其具有本质影响的诸个因素。它指出了实际发动机循环完善程度的极限标准和改进方向。

工程热力学中的气体状态方程、热力学第一定律和热力学第二定律是研究分析热力过程的最具普遍意义的基本规律和理论基础。

实际热力发动机的工作循环都是在有限的时间内完成的,每个循环进行时都与外界有热交换和物质交换,同时在循环进行中工质的组成及数量都会发生变化,既有物理(数量上)变化,也有化学(成分上)变化。为了使热力学理论分析更接近实际情况,就需要进一步讨论热力学在有限时间条件下的循环效率问题,以及在有化学组分变化(即燃烧而非加热)条件下和在非封闭条件下(即变质量情况下)的热力学定律的应用等问题。

1.2 简单热力学体系的特性

1.2.1 定义

由控制面包围的区域或物质称为体系,体系外的一切都叫做外界或环境,体系的状态可以用某个因变量参数(非独立参数)与适当的自变量参数(独立参数 x, y)之间的函数关系形式来表达。在没有相对论效应、核效应、毛细作用、电效应、磁效应、重力效应以及剪切应力的简单系统情况下,体系的状态可由两个独立参数完全决定,热力学体系一般都假定为简单体系,若 Z 为简单体系中由独立参数 x, y 确定的一个不独立参数,则

$$Z = f(x, y)$$

式中,参数间的函数关系称为状态方程。

一般热力学参数 x, y 是标量,它们可以是与所含质量无关的强度量,也可以是取决于所含质量多少的广延量。

如果 x, y 的值变化一个微量 dx 和 dy 则相关参数 Z 亦将变化一个微量 dZ ,其中算符 d 是一个完整(全)微分算符,可表示为

$$dZ = \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)_y dx + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)_x dy = Mdx + Ndy \quad (1-1)$$

若方程式有解,则一定可以通过微分独立变量 x 和 y 的某些函数来求出总的微分 dZ ,量 dZ 就称为全微分。当 M, N 任意选择时 dZ 将不是全微分,如果微分是非完整微分时,可写成 δZ 。

对一个简单体系如果存在函数关系 $Z = f(x, y)$,并在这个函数及其偏导数(M, N)在所考虑的 x, y 平面内连续,那么为使线性偏微分方程表达式 $Mdx + Ndy$ 是一个全微分,它一定要满足互逆关系,即

$$\frac{\partial M}{\partial y} = \frac{\partial N}{\partial x} \quad (1-2)$$

若式(1-2)得到满足,则根据微积分原理可得

$$\int_c (Mdx + Ndy) = \int_{ab} (Mdx + Ndy) = f(x, y) - f(a, b) \quad (1-3)$$

式中, (x, y) 和 (a, b) 是沿曲线 C 积分的起点和终点,这说明对一个全微分表达式来说线积分 $\int_c (Mdx + Ndy)$ 只取决于路途 C 的起始坐标与终点坐标,因此一个全微分表达式的线积分与连接积分端点的路径(曲线)无关。在特殊的情况下,如路径是一个闭合曲线(如一个热力学循环),则

$$\oint (Mdx + Ndy) = 0 \quad (1-4)$$

线性全微分表达式的性质可以归纳如下:

- (1) 两端点之间的线积分与连接两点的曲线无关;
- (2) 绕闭合曲线的线积分为零;
- (3) 二阶偏导数满足互逆关系 $\partial M / \partial y = \partial N / \partial x$;
- (4) 如果一个线性微分表达式在任意选定的闭合曲线上的线积分变为零,则此表达

式是一个全微分表达式;

(5) 假如一个线性微分表达式满足上述条件中任何一条,那么它必然满足所有各条。在热力学中把满足上述要求的函数称之为体系的状态参数(特性)。

1.2.2 热力学特性

热力学特性也称为状态参数、状态变量或态函数。它的变化是由两端的状态所决定而与变化过程无关,任意一个热力学特性都可以用一个或多个其他的热力学特性以函数形式来表示,如气体状态方程式 $\frac{pv}{T} = \text{常数}$ 。

热力学特性可以分为强度特性和广度特性两类:强度特性是它们的值与系统的质量无关,如压力 p 、温度 T 、密度 ρ 等,这类特性不具有相加性;广度特性是与质量成正比的热力特性,如容积、质量、内能、焓、熵、吉布斯函数、亥姆霍兹函数等,这类特性具有相加性。可以把强度特性看成是物质运动或能量变化的关键因素,是任何宏观变化过程和能量传递的推动力。广度特性则可看作在强度特性作用下,任何一种过程所产生的客观效果,因此可以把广度特性理解为一种广义的位移。

功和热为同类的物理量。但功和热都不是特性量,它们是能量的传递形式。能是物体的固有属性,是物质运动的体现,对能量进行定量描述时可以将能量分解成强度特性和广度特性的乘积。例如,通过传热过程所传递的能量等于温度差乘以该物体的热容量。前者为强度特性,后者为广度特性;前者亦可称为势变量,后者可称为位变量。某个势变量之值增大时则与之相应的位变量有变化的趋势。例如,当气体的压强增大时,则其向外扩张以增加体积的趋势就增大。因此,一切平衡均以势变数相等为条件,如体积可变的气体,其平衡条件为器壁内外的压强相等。在热力学中温度是势变量,两个物体温度不同,就有交换热量的趋势,与之相应的位变就是熵。

1.3 热力学第一定律

1.3.1 闭合变化中的功和热量的关系——热功当量

任何系统从某一平衡状态返回到相同的平衡状态即经历了一个闭合变化,则无论是消耗功以产生热量或是吸收热量以产生功,在热量和机械功之间可以互相转化,在转化中存在着确定的数量关系,所以热力学第一定律也称为等当原理。

$$W = JQ \quad (1-5)$$

式中 J ——热功当量,即为产生单位热量所需的功。

根据精确的实验测定,并为 1950 年国际计量会议所公认的 1cal 等于 4.1855J ,即 $1\text{cal} = 4.1855\text{J}$ 。

1.3.2 不闭合变化中的功和热量的关系

(1) $W = JQ$ 这个关系在不闭合系统中不能成立,因为可能出现 $Q > 0$ 而 $W = 0$; 或 $Q =$

0 而 $W > 0$ 的情况。

(2) $JQ - W$ 仅依初、终状态而定。无论系统经何种方式变化,只要有相同的初、终状态 $JQ - W$,这个量总有相同的数值。

1.3.3 热力学能

规定一个只依赖于系统状态的态函数 U 称为系统的热力学能(内能),即

$$U_A - U_B = JQ - W \quad (1-6)$$

在闭合的变化中, $U_A = U_B$, 则 $W = JQ$ 。

孤立系统(即完全隔离的系统)中, Q 与 W 恒为零,于是有 $U_A = U_B$,即在孤立系统中热力学能为常数。

由此得到热力学第一定律数学表述形式。它引进了热力学能这个重要的概念,并表达了热力学能、热量和机械功三者之间的相互转化与守恒定律。所以,热力学第一定律也称为能量守恒与转化原理。

1.3.4 几点说明

(1) 在导出式: $U_A - U_B = JQ - W$ 时,只要求初态、终态是平衡状态,至于在变化过程中所经历的各个状态则没有做任何假定,因此这个式子适用于可逆的和不可逆的一切变化。

(2) 热量 Q 不是态函数,机械功 W 也不是态函数,而热力学能 U 是一个态函数。如果初、终两态相差无限小,公式写成微分形式时,则 $dU = J\delta Q - \delta W$ 。其中, δQ 、 δW 都是无穷小的量, dU 才是无穷小的增量且是热力学能函数 U 的全微分。由于 Q 、 W 不是态函数,所以 δQ 、 δW 都不是全微分。

(3) 若欲增加系统的热力学能,既可通过供给热量(即 $Q > 0$),也可通过消耗功(即 $W > 0$)。但其效果却有所不同。

1.4 热力学第二定律

热力学第一定律确定孤立体系内全部的能量是一定的,并确定了各种形式的能量之间的当量关系;以及确定了体系热力学能的变化,被导入的热量和所作功之间的关系,即能量的守恒与转换的原理。但是,对于能量转换过程中还有一些重要问题,热力学第一定律并未能给出判断的基础。

(1) 热力学第一定律说明了第一类永动机(系统不借助于外界,可无限工作)是不可能的。但是它并不排除 $Q > 0$, $W > 0$ 。即当该系统吸收周围空气或海水中的热量,产生了功,而又返回到初始状态。如是周而复始地反复进行,永不停止,则可以产生无限的功。这种被称为第二类永动机在原理上并未违背热力学第一定律,但它也同样是不可能实现的。

(2) 热力学第一定律确定了能量的转换关系,但没有说明实施这种转换过程的可能性以及过程变化进行的方向。例如,功可以全部地、无条件地变成热;而热变成功则只有

在某些条件下才是可能的,而且不可能是全部的。又如,从热物体向冷物体的传热,这是在一切情况下都能自发地进行,而相反的过程——从冷物体向热物体的传热却是不可能自发地进行。

(3) 热力学第一定律中没有温度的概念,在热功等当原理中,供给系统以热量,只问热量的多少,不管供给热量的热源温度高低,认为相同数量的热都具有相同的价值,但实际上,热量相同而温度不同,作用的效果就有所不同,这就有加以区别的必要时。

(4) 关于可逆变化及系统平衡状态的概念。当体系内不存在平衡的条件时,如当体系内存在着温度差别时,可以发生不可逆过程,而这种过程总是向着使体系趋向于平衡方向进行,当体系达到平衡时,这样的过程也就停止。可逆过程为一连串的平衡状态或至少无限接近于平衡状态,其进行方向有正逆之分,在此状态下,正向和逆向的两个变化中,所出现的功和热,绝对值相等而符号相反。可逆变化中最简单的是等温变化和绝热变化,前者就是一个机械的可逆变化(无摩擦的机械过程)加上一个与系统温度相同的热源,后者就是一个机械的可逆变化加上绝热壁这个条件。

以上这些问题的解决有待于热力学第二定律的讨论。第二定律将指出系统变化进行的可能方向和达到平衡的必要条件。它揭示了很多过程的现象和本质,它的意义远远超出了物理学和热力学的范围。在热力发动机领域内,热力学第一定律和热力学第二定律给出了建立热力发动机理论及进行科学计算的基础。

1.4.1 热力学第二定律的表述

关于热力学第二定律的表述有许多种说法,下面介绍其中两种。

(1) 开尔文(Lord Kelvin)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引起其他变化”。

(2) 克劳修斯(R. Clausius)说法:“不可能把热量从低温物体传到高温物体而不产生其他影响”。

开尔文和克劳修斯说法的关键在于“不引起其他变化”和“不产生其他影响”。两种说法在实质上是等效的。

以上两种说法科学地论证了卡诺定理的正确性。卡诺在1824年发表的“论火的动力”论文里,总结了热机的工作过程的最本质的东西,他的结论是:热机必须工作在两个热源之间,从高温热源吸取热量,又把所吸取的热量的一部分传递给低温热源,只有这样才能获得机械功。他在这篇论文里还提出了关于热机效率的定义,即著名的卡诺定理。

1.4.2 卡诺循环与卡诺定理

卡诺循环是一种双热源的可逆循环,要实现一个可逆的闭合变化,首先需要互相交换热量的物体有无穷邻近的温度。设 T 为热源温度, T' 为冷源温度。因此,系统只有在温度 T 的时候,才可与热源交换热量;而与冷源交换热量时,系统的温度又必须是 T' 。所以系统与外界交换热量,必须经历两个等温变化,一个在温度 T ,另一个在温度 T' 。另外,系统从温度 T 可逆地变到 T' ,再从 T' 可逆地回到 T ,又必须经历两个绝热变化。这是实现