

职业技能培训教程

ZHIYEJINENGPEIXUNJIAOCHENG

汽轮机运行值班员

QI LUN JI YUN XING ZHI BAN YUAN

中国石油天然气集团公司人事服务中心 编



中国石油大学出版社

CHINA PETROLEUM UNIVERSITY PRESS

职业技能培训教程

职业技能培训教程

ISBN 978-7-304-03218-4
2007.3
中国石化大学出版

汽轮机运行值班员

中国石化天然气集团公司人事服务中心 编

中国石化天然气集团公司人事服务中心 编

ISBN 978-7-304-03218-4
2007.3
中国石化大学出版

图书在版编目(CIP)数据

汽轮机运行值班员/中国石油天然气集团公司人事服务中心编
—东营:中国石油大学出版社,2007.3
ISBN 978-7-5636-2218-4

I. 汽… II. 中… III. 火电厂—汽轮机运行—技术培训—教材 IV. TM621.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第030645号

丛 书 名: 职业技能培训教程
书 名: 汽轮机运行值班员
作 者: 中国石油天然气集团公司人事服务中心

责任编辑: 杨 勇(电话 0546—8395938)

出 版 者: 中国石油大学出版社(山东 东营 邮编 257061)

网 址: <http://www.uppbook.com.cn>

电子信箱: upccbsyangy@126.com

排 版 者: 中国石油大学出版社排版中心

印 刷 者: 青岛星球印刷有限公司

发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0546-8392565,8399580)

开 本: 185×260 印张: 24.375 字数: 624 千字

版 次: 2008年4月第1版第1次印刷

定 价: 38.00 元

职业技能培训教程

编审委员会

主任：孙祖岭

副主任：刘志华 孙金瑜 徐新福

委员：向守源 任一村 职丽枫 朱长根 郭向东
李钟磬 史殿华 马富 关昱华 郭学柱
李爱民 刘文玉 熊术学 齐爱国 刘振勇
王家夫 刘瑞善 丁传峰 乔庆恩 申泽
刘晓华 蔡激扬 阿不都·热西提 郭建
王阳福 郑兴华 赵忠文 刘孝祖 时万兴
王成 商桂秋 赵华 杨诗华 刘怀忠
杨静芬 纪安德 杨明亮 刘绍胜 姚斌
何明 范积田 胡友彬 多明轩 李明
蔡新江

前 言

为提高石油工人队伍素质,满足职工培训、鉴定需要,中国石油天然气集团公司人事服务中心继组织编写了第一批44个石油天然气特有工种的培训教程与鉴定试题集之后,又组织编写了第二、三批106个工种的职业技能鉴定试题集,并分别由石油工业出版社和中国石油大学出版社出版。根据企业组织工人进行培训和职工学习技术的需要,我们在第二、三批题库的基础上,又组织编写了第二批32个工种的工人培训教材。

本批教材只编写基础理论知识与相关专业知识部分,内容、范围与题库基本一致,不分级别,与已编写出版的第二、三批试题集配套使用,便于组织工人进行鉴定前培训。由于在公开出版发行的习题集中,只选取了题库中的部分试题,因此本批教材对工人学习技术,提高知识技能将起到应有的作用。

《汽轮机运行值班员》由大庆石油管理局组织编写,邓洪贤、李清淑任主编,其中,第一部分基础知识由谢亚军、尹兰编写;第二部分专业知识第一~三章由邓洪贤、宋保华编写,第四~十二章由徐彬、肖志萍编写;第三部分相关知识由周明哲编写。最后经中国石油天然气集团公司职业技能鉴定指导中心组织专家进行了终审,参加审定的专家有大庆油田崔光明、刘春旭、张勇、秦福涛、刘超、崔涛、韩秀云,辽河油田张志刚。在此表示衷心感谢!

由于编者水平有限,书中的错误、疏漏之处恳请广大读者提出宝贵意见。

作 者
2006年10月

目 录

第一部分 基础知识

| | |
|-----------------------|------|
| 第一章 工程热力学 | (1) |
| 第一节 热工计量单位、名称及符号 | (1) |
| 第二节 热力学第一定律及理想气体的热力过程 | (4) |
| 第三节 热力循环及热力学第二定律 | (9) |
| 第四节 水蒸气 | (11) |
| 第五节 蒸汽动力装置的循环 | (18) |
| 第六节 气体与蒸汽流动 | (21) |
| 第二章 传热学的基本知识 | (25) |
| 第一节 热交换的基本方式 | (25) |
| 第二节 传热过程及换热器 | (28) |
| 第三章 流体力学基础知识 | (33) |
| 第一节 流体的物理性质 | (33) |
| 第二节 流体静力学 | (36) |
| 第三节 流体动力学 | (38) |
| 第四节 流动阻力 | (40) |
| 第四章 金属材料 | (43) |
| 第一节 金属材料的性能 | (43) |
| 第二节 常用金属材料 | (44) |
| 第二部分 专业知识 | |
| 第一章 电力生产概论 | (46) |
| 第一节 我国电力工业发展概况 | (46) |
| 第二节 发电厂的种类和特点 | (46) |
| 第三节 火力发电厂的燃料 | (53) |
| 第四节 火力发电厂中水的应用 | (57) |
| 第五节 火力发电厂的热经济性及技术经济指标 | (59) |
| 第二章 发电厂的热力系统 | (63) |
| 第一节 原则性热力系统 | (63) |
| 第二节 全面性热力系统 | (65) |
| 第三章 汽轮机的工作原理与构造 | (88) |
| 第一节 汽轮机的基本概念及分类 | (88) |

| | | |
|------------|--------------------|-------|
| 第二节 | 汽轮机的构造 | (92) |
| 第三节 | 转子 | (115) |
| 第四节 | 轴承 | (123) |
| 第五节 | 汽封 | (133) |
| 第六节 | 盘车装置 | (138) |
| 第七节 | 联轴器 | (142) |
| 第八节 | 减速器 | (144) |
| 第九节 | 汽轮机的损失及效率 | (146) |
| (1) 第十节 | 汽轮机的变工况 | (151) |
| (1) 第十一节 | 几种典型汽轮机的结构 | (164) |
| 第四章 | 汽轮机附属设备的运行 | (170) |
| (9) 第一节 | 凝汽设备 | (170) |
| (11) 第二节 | 抽气设备 | (177) |
| (81) 第三节 | 冷却设备及系统 | (185) |
| (13) 第四节 | 给水回热设备和除氧器 | (193) |
| (23) 第五节 | 离心泵的运行 | (205) |
| (25) 第六节 | 给水泵的作用和工作特点 | (209) |
| (28) 第七节 | 循环水泵的运行 | (211) |
| (33) 第八节 | 凝结水泵的运行 | (214) |
| (35) 第九节 | 循环水泵和凝结水泵的事故处理 | (215) |
| (38) 第十节 | 疏水泵和热网循环水泵的运行 | (217) |
| 第五章 | 汽轮机的启动 | (220) |
| (40) 第一节 | 汽轮机在额定参数下的冷态启动 | (220) |
| (43) 第二节 | 汽轮机在额定参数下的热态启动 | (226) |
| (45) 第三节 | 汽轮机的滑参数启动 | (228) |
| 第六章 | 汽轮机的停机 | (231) |
| 第一节 | 汽轮机在额定参数下的正常停机 | (231) |
| 第二节 | 汽轮机滑参数停机 | (233) |
| 第三节 | 汽轮机的紧急停机 | (235) |
| 第七章 | 汽轮机的正常运行及维护 | (236) |
| (48) 第一节 | 蒸汽参数变化对汽轮机工作的影响 | (236) |
| (49) 第二节 | 汽轮机运行中的正常维护 | (239) |
| (53) 第三节 | 汽轮机通流部分结垢及其处理 | (241) |
| (57) 第四节 | 汽轮机的经济运行 | (243) |
| (60) 第五节 | 汽轮机的试验 | (247) |
| (63) 第六节 | 机炉协调控制 | (250) |
| (65) 第七节 | 汽轮机保护 | (254) |
| 第八章 | 中间再热式汽轮机的运行 | (257) |
| (68) 第一节 | 中间再热式汽轮机的启动特点 | (257) |
| (68) 第二节 | 中间再热式汽轮机的停机特点 | (258) |

| | |
|------------------------------|-------|
| 第九章 汽轮机的热膨胀和热应力 | (260) |
| 第一节 汽轮机的热膨胀..... | (260) |
| 第二节 汽轮机的热变形..... | (263) |
| 第三节 汽轮机的热应力..... | (266) |
| 第十章 汽轮机的事故处理 | (271) |
| 第一节 真空下降..... | (271) |
| 第二节 水冲击..... | (274) |
| 第三节 油系统事故..... | (275) |
| 第四节 叶片损坏事故..... | (277) |
| 第五节 甩负荷..... | (278) |
| 第六节 汽轮发电机组的振动和异音..... | (279) |
| 第七节 火灾事故..... | (281) |
| 第八节 厂用电中断..... | (282) |
| 第十一章 热网的运行与维护 | (285) |
| 第一节 热负荷与热电联产..... | (285) |
| 第二节 供热系统及载热质..... | (287) |
| 第三节 热电联产的经济性及主要指标..... | (288) |
| 第四节 热电厂的供热系统..... | (295) |
| 第五节 热网加热器..... | (299) |
| 第六节 减温减压装置..... | (301) |
| 第七节 热水锅炉..... | (303) |
| 第八节 热网运行维护..... | (304) |
| 第九节 汽水系统和热网加热器的清洗..... | (312) |
| 第十节 投运前的检查和调整试验..... | (315) |
| 第十一节 热网整套设备的试运行..... | (317) |
| 第十二节 热网季节性停用及停用保护..... | (318) |
| 第十三节 热力网的自动、程控和保护装置..... | (320) |
| 第十二章 新机组启动及试运行 | (323) |
| 第一节 新机组试运前的准备工作..... | (323) |
| 第二节 新机组启动前的检查试验..... | (324) |
| 第三节 分部试运及冲转前的试验..... | (326) |
| 第四节 机组整套试运行..... | (331) |

第三部分 相关知识

| | |
|------------------------|-------|
| 第一章 厂用电系统 | (338) |
| 第一节 电工学基础..... | (338) |
| 第二节 电气设备基础..... | (343) |
| 第二章 热工自动化 | (350) |
| 第一节 热工测量..... | (350) |

| | | |
|-------------|-------------------|--------------|
| 第二节 | 模拟量控制 | (353) |
| 第三节 | 开关量控制 | (355) |
| 第四节 | 汽轮机组监控系统 | (360) |
| 第三章 | 环境保护 | (363) |
| 第一节 | 法规与标准 | (363) |
| 第二节 | 大气污染及其控制技术 | (365) |
| 第三节 | 水体污染及其控制技术 | (366) |
| 第四节 | 噪声污染及其控制技术 | (367) |
| 第四章 | 安全知识 | (368) |
| 第一节 | 健康、安全、环境管理体系 | (368) |
| 第二节 | 安全规程知识 | (369) |
| 第三节 | 消防安全知识 | (372) |
| 第四节 | 急救常识 | (374) |
| 第五章 | 全面质量管理体系知识 | (377) |
| 第一节 | 概述 | (377) |
| 第二节 | ISO 9001 质量管理体系 | (378) |
| 参考文献 | | (380) |

附录三 参考文献

| | | |
|-------|-------|-------|
| (380) | ..... | 第一章 |
| (381) | ..... | 第二章 |
| (382) | ..... | 第三章 |
| (383) | ..... | 第四章 |
| (384) | ..... | 第五章 |
| (385) | ..... | 第六章 |
| (386) | ..... | 第七章 |
| (387) | ..... | 第八章 |
| (388) | ..... | 第九章 |
| (389) | ..... | 第十章 |
| (390) | ..... | 第十一章 |
| (391) | ..... | 第十二章 |
| (392) | ..... | 第十三章 |
| (393) | ..... | 第十四章 |
| (394) | ..... | 第十五章 |
| (395) | ..... | 第十六章 |
| (396) | ..... | 第十七章 |
| (397) | ..... | 第十八章 |
| (398) | ..... | 第十九章 |
| (399) | ..... | 第二十章 |
| (400) | ..... | 第二十一章 |
| (401) | ..... | 第二十二章 |
| (402) | ..... | 第二十三章 |
| (403) | ..... | 第二十四章 |
| (404) | ..... | 第二十五章 |
| (405) | ..... | 第二十六章 |
| (406) | ..... | 第二十七章 |
| (407) | ..... | 第二十八章 |
| (408) | ..... | 第二十九章 |
| (409) | ..... | 第三十章 |
| (410) | ..... | 第三十一章 |
| (411) | ..... | 第三十二章 |
| (412) | ..... | 第三十三章 |
| (413) | ..... | 第三十四章 |
| (414) | ..... | 第三十五章 |
| (415) | ..... | 第三十六章 |
| (416) | ..... | 第三十七章 |
| (417) | ..... | 第三十八章 |
| (418) | ..... | 第三十九章 |
| (419) | ..... | 第四十章 |
| (420) | ..... | 第四十一章 |
| (421) | ..... | 第四十二章 |
| (422) | ..... | 第四十三章 |
| (423) | ..... | 第四十四章 |
| (424) | ..... | 第四十五章 |
| (425) | ..... | 第四十六章 |
| (426) | ..... | 第四十七章 |
| (427) | ..... | 第四十八章 |
| (428) | ..... | 第四十九章 |
| (429) | ..... | 第五十章 |
| (430) | ..... | 第五十一章 |
| (431) | ..... | 第五十二章 |
| (432) | ..... | 第五十三章 |
| (433) | ..... | 第五十四章 |
| (434) | ..... | 第五十五章 |
| (435) | ..... | 第五十六章 |
| (436) | ..... | 第五十七章 |
| (437) | ..... | 第五十八章 |
| (438) | ..... | 第五十九章 |
| (439) | ..... | 第六十章 |
| (440) | ..... | 第六十一章 |
| (441) | ..... | 第六十二章 |
| (442) | ..... | 第六十三章 |
| (443) | ..... | 第六十四章 |
| (444) | ..... | 第六十五章 |
| (445) | ..... | 第六十六章 |
| (446) | ..... | 第六十七章 |
| (447) | ..... | 第六十八章 |
| (448) | ..... | 第六十九章 |
| (449) | ..... | 第七十章 |
| (450) | ..... | 第七十一章 |
| (451) | ..... | 第七十二章 |
| (452) | ..... | 第七十三章 |
| (453) | ..... | 第七十四章 |
| (454) | ..... | 第七十五章 |
| (455) | ..... | 第七十六章 |
| (456) | ..... | 第七十七章 |
| (457) | ..... | 第七十八章 |
| (458) | ..... | 第七十九章 |
| (459) | ..... | 第八十章 |
| (460) | ..... | 第八十一章 |
| (461) | ..... | 第八十二章 |
| (462) | ..... | 第八十三章 |
| (463) | ..... | 第八十四章 |
| (464) | ..... | 第八十五章 |
| (465) | ..... | 第八十六章 |
| (466) | ..... | 第八十七章 |
| (467) | ..... | 第八十八章 |
| (468) | ..... | 第八十九章 |
| (469) | ..... | 第九十章 |
| (470) | ..... | 第九十一章 |
| (471) | ..... | 第九十二章 |
| (472) | ..... | 第九十三章 |
| (473) | ..... | 第九十四章 |
| (474) | ..... | 第九十五章 |
| (475) | ..... | 第九十六章 |
| (476) | ..... | 第九十七章 |
| (477) | ..... | 第九十八章 |
| (478) | ..... | 第九十九章 |
| (479) | ..... | 第一百章 |

第一部分 基础知识

第一章 工程热力学

工程热力学是研究热能和其他能量之间相互转换规律的一门学科,通过本教程的学习,使工人了解热力学的宏观研究方法,掌握热力学的基本概念和基本定律,能够正确运用热力学的基本原理和定律进行热力过程和热力循环的分析和计算,建立合理、有效利用能源的概念,为实际工作中的有关热能利用和热能管理打下基础。

本章主要讲解工程热力学的基本概念、热力学第一定律、热力学第二定律、理想气体和理想气体的热力过程、水蒸气以及蒸汽动力循环等内容。

第一节 热工计量单位、名称及符号

一、国际单位制

国际单位制是由国际计量大会通过决定采用的一种单位制。以米(m)、千克(kg)、秒(s)、安[培](A)、开[尔文](K)、摩[尔](mol)和坎[德拉](cd)作为基本单位,其他单位均由这7个单位导出。

国际单位制的基本单位见表 1-1-1。

表 1-1-1 国际单位制(SI)的基本单位

| 序 号 | 量的名称 | 单位名称 | 单位符号 |
|-----|-------|-------|------|
| 1 | 长 度 | 米 | m |
| 2 | 质 量 | 千 克 | kg |
| 3 | 时 间 | 秒 | s |
| 4 | 热力学温度 | 开[尔文] | K |
| 5 | 物质的量 | 摩[尔] | mol |
| 6 | 电 流 | 安[培] | A |
| 7 | 发光强度 | 坎[德拉] | cd |

二、物理量的名称及符号

(一) 压强

物体所受到的垂直作用力称为压力,而把单位面积上所受的垂直力称为压强。在工程热力学和流体力学中,把气体或流体作用在单位容器壁面积上的垂直力称为压强,用符号 p 表示,即

$$p = F/A \quad (\text{N/m}^2) \quad (1-1-1)$$

式中 F ——垂直作用力, N;

A——面积, m^2 。

1. 压强的单位

(1) 在国际单位制中,表示压强的单位采用帕(斯卡),符号是 Pa。在热力学上,“Pa”显得太小,常用到“kPa”和“MPa”。

(2) 工程大气压的单位为 kgf/cm^2 ,常用 at 作为代表符号。

(3) 以液柱高度表示压力的单位有: mmHg(约定毫米汞柱)。

(4) 工程单位、国际单位之间的换算关系为:

$$1 \text{ MPa} = 10^3 \text{ kPa} = 10^6 \text{ Pa} = 10 \text{ bar}$$

$$1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa} = 1.013 \text{ bar}$$

$$1 \text{ at} = 98\,066.5 \text{ Pa} = 735.6 \text{ mmHg}$$

2. 大气压力

在物理学中,把纬度为 45° 平均海平面上常年大气压的平均值定义为标准大气压,用符号 atm 表示。

(二) 温度

1. 温度

温度是衡量物体冷热程度的物理量。

2. 温标

对温度高低量度的标尺称为温标。常用的有摄氏温标和绝对温标。

(1) 摄氏温标。规定在标准大气压下纯水的冰点为 0°C ,沸点为 100°C ,在 0°C 与 100°C 之间分成 100 个格,每格为 1°C ,这种温标为摄氏温标,用 $^\circ\text{C}$ 表示单位符号,用 t 作为物理量符号。

(2) 绝对温标。规定水的三相点(水的固、液、气三相平衡的状态点)的温度为 273.16 K。绝对温标用 K 表示单位符号,用 T 作为物理量符号。

0°C 对应的热力学温度为 273.15 K,因此摄氏温标与绝对温标的关系为:

$$T = t + 273.15 \text{ (K)} \quad (1-1-2)$$

式中 t ——摄氏温标, $^\circ\text{C}$;

T ——绝对温标, K。

在工程计算中,一般用 $T \approx t + 273$ 。绝对温度与摄氏温度只是起点不同,每 1°C 与 1 K 的大小是相同的。

(三) 比体积和密度

单位质量的物质所占有的体积称为比体积,用符号 v 表示,即

$$v = \frac{V}{m} \text{ (m}^3/\text{kg)} \quad (1-1-3)$$

式中 V ——物质所占的体积, m^3 ;

m ——物质的质量, kg。

单位体积物质所具有的质量称为密度,用符号 ρ 表示,即

$$\rho = \frac{m}{V} \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (1-1-4)$$

式中 m ——物质的质量, kg;

V ——物质所占的体积, m^3 。

比体积与密度的关系为 $\rho v = 1$, 显然比体积和密度互为倒数, 即比体积和密度不是相互独立的 2 个参数, 而是同一个参数的 2 种不同的表示方法。

(四) 功及功率

1. 功

功是力所作用的物体在力的方向上的位移与该作用力的乘积。功的大小应根据物体在力的作用下, 沿力的作用方向移动的位移来决定, 改变它的位移, 就改变了功的大小, 可见功不是状态参数, 而是与过程有关的一个量。

功 W 的计算公式为:

$$W = Fs \quad (\text{J}) \quad (1-1-5)$$

式中 F ——沿位移方向的作用力, N;

s ——位移, m。

2. 功率

单位时间内所做的功叫做功率, 单位为瓦特, 符号为 W(瓦)或 kW(千瓦), $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$, $1 \text{ kW} = 1 \text{ kJ/s}$, 还有的采用千瓦时($\text{kW} \cdot \text{h}$): $1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 1 \text{ kJ/s} \times 3600 \text{ s} = 3600 \text{ kJ}$ 。功率大小可以说明不同机器的做功能力。应该注意的是功有正负之分。热力学中通常规定膨胀功为正功, 压缩功为负功。而功率是没有正负之分的。

3. 功的单位及正负

质量为 $m(\text{kg})$ 的工质所做的功用符号 W 表示, 单位为 J(焦)或 kJ(千焦)。

单位换算:

$$1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$1 \text{ kJ} = 2.778 \times 10^{-4} \text{ kW} \cdot \text{h}$$

单位质量工质所做的功称为比功, 用符号 w 表示, 单位为 J/kg 或 kJ/kg。功和比功统称为功, 其相互关系是:

$$W = mw \quad (\text{J}) \quad \text{或} \quad w = W/m \quad (\text{J/kg})$$

功有正负之分, 热力学规定, 系统对外做功时, 功取正值, 即 $W > 0$; 外界对系统做功时, 功取负值, 即 $W < 0$ 。

(五) 热量

在热力学中, 把系统和外界由于存在温差而通过边界传递的能量称为热量, 用符号 Q 表示。并规定: 外界给系统加热, Q 取正值; 反之, 系统对外界放热, Q 取负值。热量传递的多少与热力过程有关, 只有在能量传递的热力过程中才有功和热量的存在, 没有能量传递的热力状态是根本不存在什么热量的。

热量 Q 的国际单位为 kJ(千焦), 工程单位为 kcal(千卡或大卡), 英制中的热量单位为 Btu。这三者的换算关系为:

$$1 \text{ kJ} = 0.2388 \text{ kcal} = 0.948 \text{ Btu}$$

质量为 1 kg 的工质的吸热量(或放热量)称为单位质量热量, 用符号 q 表示, 其单位为 kJ/kg 或 kcal/kg。

(六) 热容和比热容

质量为 m 的物质, 温度升高(或降低) 1°C 所吸收(或放出)的热量称为该物质的热容。

单位质量物质的热容, 称为该物质的比热容。按照计量单位的不同, 比热容可分为 3 类: 取 1 kg 质量作为计量单位时, 所得的热容称为质量热容(比热容), 用符号 c 表示, 单位为

$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;取标准状态下 1 m^3 气体的容积作为计量单位时,所得的热容称为容积热容,用符号 c' 表示,单位为 $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$;取摩尔作为计算单位时,所得的热容称为摩尔热容,用符号 c_m 表示,单位为 $\text{kJ}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

因此,热容 C 的计算公式为:

$$C = mc \quad (\text{J}/\text{K}) \quad (1-1-6)$$

式中 m ——物体的质量, kg ;

c ——比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

热容的大小等于物体的质量与比热容的乘积。热容与质量有关,比热容与质量无关,对于相同质量的物体,比热容大的热容大,对于同一物质,质量大的热容大。

第二节 热力学第一定律及理想气体的热力过程

一、工质及热源

(一) 工质

工质是热机中热能转变为机械能的一种媒介物质(如燃气和蒸汽等),依靠它在热机中的状态变化(如膨胀)才能获得功。

为了在工质膨胀中获得较多的功,工质应具有良好的膨胀性。在热机的不断工作中,为了方便工质流入与排出,还要求工质具有良好的流动性。因此,在物质的固、液、气三态中,气态物质是较为理想的工质。目前,火力发电厂主要以水蒸气作为工质。

(二) 热源

工质在进行能量转换时,必须先吸收热能,这种热能或从燃烧或从其他物体获得,但效果是相同的,即必须有提供热能的高温物体。这种能不断给工质提供热能的高温物体称为高温热源,简称热源。

在热机中,工质将所携带的热能一部分转换为机械能,另一部分排至大气或其他物体。我们把这种能不断接受工质排出余热的物体称为低温热源,简称冷源,如凝汽器或大气环境。在蒸汽动力装置中,燃料(煤、油等)不断地被送入锅炉中燃烧,所以可将热源的热容量视为无限大,温度不会因为工质吸热传热而下降,即热源的溫度恒定不变。同理,工质放热给大气或凝汽器时,大气或冷却水的热容量也可视为无限大,即冷源溫度恒定不变。

二、能量守恒与转换定律

能量从一个物体传递到另一个物体可有 2 种方式:一种是做功,另一种是传热。借做功来传递能量总是和物体的宏观位移有关。借传热来传递能量就不需要有物体的宏观移动。热源和工质接触就把能量直接传递给工质,它是通过接触处 2 个物体中杂乱运动的质点之间的能量交换而进行的。“自然界的一切物质都具有能量。能量有各种不同的形式,它能够从一种形式转换为另一种形式,由一个系统传递给另一个系统,但是,在转换和传递时能量不可能被创造,也不可能被消灭。”这就是能量守恒与转换定律。

能量守恒与转换定律是自然界最基本的定律,它是自然界中各种形式的能量在相互转换时所遵循的普遍法则。能量守恒与转换定律不是从理论上推导出来的,而是人类长期实践经验的科学总结。

三、热力学第一定律

热力学第一定律是能量守恒与转换定律在热力系统中的具体应用。当系统与外界发生能

量传递与转换时,热力学第一定律可表述如下:

进入系统的能量=系统内能的增加+离开系统的能量

一 (一) 工质的内能

系统内工质分子不规则热运动所具有的能量,称为工质的内能。处于平衡状态的封闭系统,其内能为 U ,质量为 m ,则单位质量工质所具有的内能,称为比内能,用符号 u 表示,其单位为 kJ/kg ,即

$$u = \frac{U}{m} \quad (\text{kJ/kg}) \quad (1-1-7)$$

按照分子运动论的观点,系统的内能包括:

- (1) 分子作移动运动所具有的移动动能。
- (2) 分子绕其中心作旋转运动所具有的转动动能。
- (3) 分子内部的原子在其平衡位置附近作振动运动而具有的振动动能。
- (4) 分子之间的内聚力作用而具有的分子间的位能。

对于理想气体,分子间的内聚力可以忽略不计,所以没有分子间的位能。按照分子运动论的观点,分子的移动动能、转动动能和振动动能统称为内动能,内动能仅仅是绝对温度的函数。因此,理想气体的内能只能是绝对温度的函数,即

$$U = f(T) \quad \text{或} \quad u = \varphi(T)$$

对于实际气体,除内动能外,尚有分子间的位能(又称内位能),它与分子间的距离有关,是比体积的函数。因此,实际气体的内能是绝对温度和比体积 2 个状态参数的函数,即

$$U = f(T, v) \quad \text{或} \quad u = \varphi(T, v)$$

总之,不论是理想气体还是实际气体,当状态一定时,就有一个确定的温度和比体积,代入上式后,就可以得到一个确定的内能值。可见,内能是工质的一个状态参数,当工质由初态变化到终态时,内能的变化量只与初、终状态有关,而与由初态变化到终态的途径无关。当工质由初态经过一系列变化又回到初态时,则内能变化量为 0。

(二) 焓

工质在流动过程中,将流动功 pV 带入或带出系统的同时,其内能 U 也将发生变化,这两者通常是同时出现。为了分析和计算方便,常把内能 U 和流动功合在一起,用一个新的物理量“焓”定义,它的表示符号为 H ,即

$$H = U + pV \quad (1-1-8)$$

焓的单位为 J 或 kJ 。

单位质量工质的焓称为比焓(实际中常简称为焓),用符号 h 表示,单位为 J/kg 或 kJ/kg 。其表达式为:

$$h = \frac{H}{m} = u + pv \quad (1-1-9)$$

由焓的定义式可以看出,焓是由状态参数 u 、 p 、 v 组成的综合量。当工质的某一状态确定时, u 、 p 、 v 随即确定,因而 $(u + pv)$ 也就确定。由此可知,焓具有状态参数的一切特征,是工质的状态参数。

物质是永恒的,运动也是永恒的,因而无法找到焓值为 0 的基准点,和内能一样,一般只计算焓的变化量,即 $\Delta h = h_2 - h_1$ 。如要计算工质在某状态的焓值,可以选用任意一个初态点作为起点,通常规定 0°C 的焓值为 0。

当工质从一个状态变化到另一个状态时,如焓值增加,说明系统给工质传递了能量,则 Δh

>0 ;如焓值减少,说明工质给系统传递了能量,则 $\Delta h < 0$;如焓值不变,则 $\Delta h = 0$ 。

(三) 工质膨胀(或压缩)的容积功

在热力计算中,常用到压力 p 为纵坐标、比体积 v 为横坐标的 $p-v$ 图, $p-v$ 图上任意一点 (p_1, v_1) 表示工质的一个平衡状态;反之,工质的任意一个平衡状态都可用 $p-v$ 图中一个确定点来表示。

在封闭气缸内有 1 kg 工质,如图 1-1-1 所示,令工质从初态 1 沿过程 1—A—2 膨胀到终态 2,现在来计算系统在膨胀过程中对外界所做的单位质量功。

整个过程中系统对外界所做的单位质量功为:

$$w = \int_1^2 p dv$$

如果过程 1—A—2 的方程 $p = f(v)$ 已给定,代入上式便可得到单位质量膨胀功的数值为:

$$w = \int_1^2 p dv = \text{面积 } 1A2341$$

可见,系统对外界做单位质量膨胀功 w 的数值,可由 $p-v$ 图上过程曲线 1—A—2 下面的面积 1A2341 表示。从图上还可以看出,从初态 1 到终态 2 的过程可以沿着不同的途径进行,因而就对应着不同的单位质量功。可见,功不是状态参数,而是过程的函数。

从上式可以看出,当 $dv > 0$ 时, $w > 0$,即工质膨胀时,系统对外界做功;反之,当 $dv < 0$ 时, $w < 0$,即工质被压缩时,外界对系统做功。

如果系统中工质的质量为 m ,则 $V = mv$,这时系统对外界做的功为:

$$W = \int_1^2 p dV = \int_1^2 p d(mv) = m \int_1^2 p dv = mw \quad (1-1-10)$$

(四) 热力学第一定律的数学表达式

现在以封闭系统为例(见图 1-1-2),说明热力学第一定律。设封闭系统有质量为 m 的工质,当外界加给系统热量 Q 时,系统内能增加了 ΔU ,同时由于工质推动活塞右移,对外界做了膨胀功 W 。热力学第一定律认为:当系统与外界发生能量传递与转换时,加给系统的能量等于系统内能的增加与系统对外界做功之和。因此,热力学第一定律的数学表达式为:

$$Q = \Delta U + W$$

对于 1 kg 工质来说,热力学第一定律的数学表达式为:

$$q = \Delta u + w$$

对于一个微小的变化过程,热力学第一定律的表达式为:

$$dq = du + dw$$

$Q > 0$,表示外界对系统加热; $Q < 0$,表示系统对外界放热; $\Delta U > 0$,表示系统内能增加; $\Delta U < 0$,表示系统内能减少; $W > 0$,表示系统对外界做功, $W < 0$,表示外界对系统做功。

(五) 理想气体热力学第一定律

对于理想气体,比内能只是温度的函数。因此,不论是否是定容过程,只要初温相同,终温

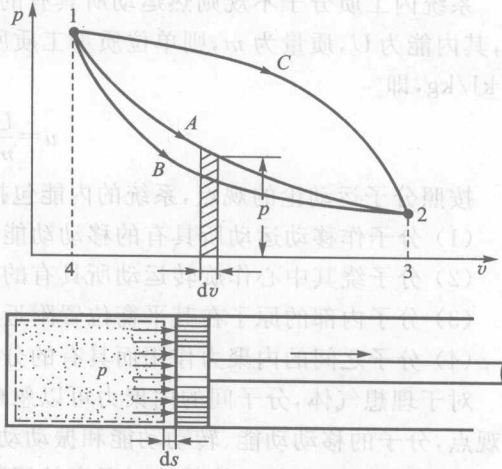


图 1-1-1 工质在气缸中的膨胀功

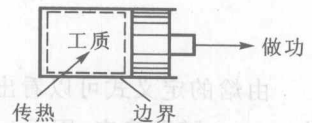


图 1-1-2 闭口热力系

也相同,比内能的变化就完全相等。所以,不论什么过程,均可用下式计算理想气体比内能的变化量,即

$$du = c_v dT \quad \text{或} \quad \Delta u = c_v (T_2 - T_1)$$

理想气体热力学第一定律的表达式为:

$$dq = c_v dT + p dv \quad \text{或} \quad q = c_v (T_2 - T_1) + \int_1^2 p dv \quad (1-1-11)$$

式中 c_v ——定容质量热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;

p ——绝对压力, Pa ;

T_1, T_2 ——气体的初温和终温, K 。

四、理想气体的基本热力过程

(一) 理想气体与实际气体

气体分子间不存在引力,分子本身不占有体积的气体叫做理想气体。反之,气体分子间存在引力,分子本身占有体积的气体叫做实际气体。

在火力发电厂中,空气、燃气和烟气可以作为理想气体看待,因为它们远离液态,与理想气体的性质很接近。在蒸汽动力设备中,作为工质的水蒸气,因其压力高,比体积小,即气体分子间的距离比较小,分子间的吸引力也相当大,接近液态,所以水蒸气应作为实际气体看待。

(二) 理想气体状态方程式

当 1 kg 理想气体处于平衡状态时,在确定的状态参数 p, v, T 之间存在着一定的关系,这种关系可表达为: $p v = R T$, 即为 1 kg 理想气体状态方程式。如果气体质量为 m (kg), 则气体状态方程式为:

$$p V = m R T \quad (1-1-12)$$

式中 p ——气体的绝对压力, Pa ;

V ——气体的体积, m^3 ;

T ——气体的热力学温度, K ;

R ——气体常数, $\text{N} \cdot \text{m}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 或 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

气体常数 R 与状态无关,但对不同的气体却有不同的气体常数。例如,空气的气体常数 $R = 287 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 氧气的气体常数 $R = 259.8 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

(三) 理想气体的基本热力过程

1. 等容过程

容积不变的热力过程称为等容过程。由 $v = \text{常数}$ 和状态方程 $p v = R T$, 可以求得初、终状态参数的关系为: $\frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1}$, 即等容过程中压力与温度成正比。

因 $\Delta v = 0$, 所以容积变化功 $w = 0$, 则 $q = \Delta u + w = \Delta u = u_2 - u_1$, 也即等容过程中, 所有加入的热量全部用于增加气体的内能。

等容过程中, 单位质量气体的热量变化可按定容质量热容进行计算, 即

$$q_v = c_v (T_2 - T_1) \quad (1-1-13)$$

式中 c_v ——定容质量热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;

T_1, T_2 ——气体的初温和终温, K 。

在等容过程中系统不对外做膨胀功, 所以外界加入系统的热量全部用来增加系统的内能; 反之, 系统向外界放热时, 放出的热量全部由系统内能的减少来补偿。

2. 等压过程

压力不变的热力过程称为等压过程。由 $p = \text{常数}$ 和状态方程 $p v = RT$, 可求得初、终状态参数之间的关系为: $\frac{v_2}{v_1} = \frac{T_2}{T_1}$, 即等压过程中比体积与温度成正比。

等压过程做的功为:

$$w = p(v_2 - v_1) \quad (1-1-14)$$

等压过程中, 单位质量气体的热量变化可按定压质量热容进行计算, 即

$$q_p = c_p(T_2 - T_1) \quad (1-1-15)$$

式中 c_p ——定压质量热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;

T_1, T_2 ——气体的初温和终温, K 。

q_p 也可按理想气体热力学第一定律来计算, 即

$$q_p = c_p(T_2 - T_1) + R(T_2 - T_1) \quad (1-1-16)$$

由此可以看出, 在等压过程中, 外界加给系统的热量一部分用于增加系统的内能, 其余部分用于系统对外界膨胀做功。

3. 等温过程

温度保持不变的热力过程称为等温过程。由于 $T = \text{常数}$, 按照状态方程可得过程方程为: $p v = \text{常数}$, 即等温过程中压力与比体积成反比。

在等温过程中, 单位质量膨胀功为:

$$w_T = \int_1^2 p dv = \int_1^2 \frac{RT}{v} dv = RT \int_1^2 \frac{1}{v} dv = RT \ln \frac{p_1}{p_2} = p_1 v_1 \ln \frac{p_1}{p_2} \quad (1-1-17)$$

式中 p_1, p_2 ——气体的初压和终压, Pa ;

v_1 ——气体的初始比体积, m^3/kg 。

当等温膨胀时, w_T 为正值, 表示气体对外界做膨胀功; 当等温压缩时, w_T 为负值, 表示外界压缩气体消耗功。

等温过程中, 气体的比内能变化量为 0, 即

$$\Delta u = c_v(T_2 - T_1)$$

按照理想气体热力学第一定律, 等温过程中单位质量气体的热量变化为:

$$q = \Delta u + w = T(s_2 - s_1) \quad (1-1-18)$$

式中 s_1, s_2 ——初、终状态的比熵, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

可见在等温过程中, 外界加给系统的热量全部用于系统对外做膨胀功; 反之, 外界对系统做的压缩功全部转换为向外界放热。由于外界所加的热量与对外做的膨胀功在数量上相等, 所以系统内能没有变化, 对理想气体而言, 温度也就没有变化。这就是在等温过程中对工质加热而工质温度仍保持不变的原因。

4. 绝热过程

系统与外界在任何时刻都不发生热传递的热力过程称为绝热过程。如汽轮机为了减少散热损失, 汽缸外侧包有绝热材料, 而工质所进行的膨胀过程极快, 在极短时间内来不及散热, 其热量损失很小, 可忽略不计, 故常把工质在这些热机中的过程作为绝热过程处理。

在绝热过程中, 按热力学第一定律可得:

$$\Delta u + w = 0 \quad \text{或} \quad \Delta u = -w$$

即绝热过程中膨胀功来自内能的减少, 而压缩功使内能增加。