


新版

全国海船船员适任考试培训教材

轮机工程基础

(上册)

 中国海事服务中心组织编审



大连海事大学出版社
Dalian Maritime University Press



人民交通出版社
China Communications Press

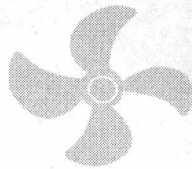
新版

全国海船船员适任考试培训教材

轮机工程基础

(上册)

中国海事服务中心组织编审



大连海事大学出版社
人民交通出版社

© 任福安,王名涌 2008

中国船舶工业总公司大连理工大学



图书在版编目(CIP)数据

轮机工程基础.上册 / 任福安,王名涌主编. —大连:大连海事大学出版社;北京:人民交通出版社,2008.5

全国海船船员适任考试培训教材

ISBN 978-7-5632-2174-5

I. 轮… II. ①任…②王… III. 轮机—技术培训—教材 IV. U676.4

中国船舶工业总公司大连理工大学

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 067075 号

大连海事大学出版社出版

地址:大连市凌海路1号 邮编:116026 电话:0411-84728394 传真:0411-84727996

<http://www.dmupress.com>

E-mail: cbs@dmupress.com

大连天正华延彩色印刷有限公司印装 大连海事大学出版社发行

2008年5月第1版

2008年5月第1次印刷

幅面尺寸:185 mm × 260 mm 印张:24

字数:611千

印数:1~5000册

责任编辑:黎为

版式设计:书严

封面设计:王艳

责任校对:苏炳魁

ISBN 978-7-5632-2174-5

定价:63.00元

前 言

《中华人民共和国海船船员适任考试、评估和发证规则》(简称 04 规则)已于 2004 年 8 月 1 日生效,新的《中华人民共和国海船船员适任考试大纲》也自 2006 年 2 月 1 日实施。为了更好地帮助、指导船员进行适任考前培训和进一步提高船员适任水平,在交通部海事局的领导下,中国海事服务中心组织全国有丰富教学、培训经验和航海实际经验的专家共同编写了与《中华人民共和国海船船员适任考试大纲》相适应的培训教材。本教材的编写将改变长期以来船员适任培训使用本、专科教材的现状,消除由于教材版本众多所造成知识内容上存在的混淆和分歧,对今后的船员适任培训具有重要的指导意义。

本套教材知识点紧扣考试大纲,具有权威、准确、系统、实用的特点,重点突出船员适任考前培训和航海实践需掌握的知识,旨在培养船员在实践中应用知识的能力,并可作为工具书为船员上船工作使用。本套教材在着重于航海实践的同时,紧密结合现代船舶的特点,考虑到将来有关船舶技术的发展,教材内容涉及到最新的航海技术,与时俱进,进一步拓展船员的知识层次。

本套教材由航海学、船舶值班与避碰、航海气象与海洋学、船舶操纵、海上货物运输、船舶结构与设备、船舶管理(驾驶)、船长业务、航海英语、轮机英语、轮机长业务、轮机工程基础、主推进动力装置、船舶辅机、船舶电气、轮机自动化、轮机维护与修理、船舶管理(轮机)组成。

本套教材在编写、出版工作中得到中华人民共和国海事局、各航海院校、海员培训机构、航运企业、人民交通出版社、大连海事大学出版社等单位的关心和大力支持,特致谢意。

中国海事服务中心
2008 年 2 月

编者的话

《轮机工程基础》是根据中华人民共和国海事局制定的《中华人民共和国海船船员适任考试大纲》而编写的,其内容符合 STCW 公约,全面覆盖中华人民共和国海事局新修订的考试大纲内容。

《轮机工程基础》内容贯彻理论联系实际和少而精的原则,既参考了以往各类考证教材,又注重最新知识的补充,做到由浅入深,具有系统性、实用性,便于自学。

《轮机工程基础》分上、下两册。上册作为参加管理级轮机员适任考试用书,内容包括:工程热力学、传热学、理论力学、机械振动、材料力学、流体力学和金属材料及其工艺等基本知识。下册作为参加操作级轮机员适任考试用书,内容包括:力学基础、金属材料及其工艺、机械制图基础、机械制图、仪表与量具、单位及单位换算和机构与机械传动等基本知识。

本书由大连海事大学任福安教授、青岛远洋船员学院王名涌副教授主编,任福安教授统稿。参加编写的还有杨华、严春吉、金蓉、李香琪、王守旭、陈爱玲等(排名不分先后)。中国海事服务中心考试中心黄党和、上海远洋运输公司海事培训中心龚卫清参与了主要审定工作。

编者在编写过程中参阅了大量的相关教材、教辅参考书及技术手册、图片等资料、文献,在此向原作者致以衷心的感谢。如有不敬之处,恳请见谅。

由于编者水平所限,书中不妥之处在所难免,欢迎使用者批评指正。

编者
2008年2月

目 录

第一章 工程热力学	1
第一节 基本概念	1
第二节 热力学第一定律	13
第三节 热力学第二定律	19
第四节 理想气体	26
第五节 水蒸气	39
第六节 气体和蒸气的流动	45
第七节 压缩机的热力过程	55
第八节 气体动力循环	62
第九节 蒸气压缩制冷循环	73
第十节 湿空气	78
第二章 传热学	89
第一节 换热过程	89
第二节 传热过程	113
第三章 理论力学	130
第一节 力学基础	130
第二节 刚体系统的平衡 摩擦	139
第三节 刚体的基本运动	154
第四章 机械振动	166
第一节 机械振动及其分类	166
第二节 自由振动	168
第三节 有阻尼受迫振动	170
第四节 振动的利用及消除方法	173
第五章 材料力学	175
第一节 材料力学的基本概念	175
第二节 轴向拉伸与压缩	180
第三节 剪切与挤压	188
第四节 扭转	192
第五节 弯曲	200
第六节 薄壁容器的强度	215
第七节 应力集中	218
第八节 构件的疲劳损坏及预防	220
第六章 流体力学	231
第一节 流体的主要物理性质	231
第二节 流体静力学基本方程	242
第三节 流体运动学基础	253

第四节 流体动力学基础.....	261
第七章 金属材料及其工艺.....	290
第一节 钢的热处理.....	290
第二节 金属材料的常用冷加工工艺.....	316
第三节 常用材料.....	321
第四节 轮机主要零件的材料.....	345
第五节 船体结构和设备的材料.....	351
练习题	354
参考文献.....	376

129	.....	.....	.....
131	.....	.....	.....
132	.....	.....	.....
133	.....	.....	.....
134	.....	.....	.....
135	.....	.....	.....
136	.....	.....	.....
137	.....	.....	.....
138	.....	.....	.....
139	.....	.....	.....
140	.....	.....	.....
141	.....	.....	.....
142	.....	.....	.....
143	.....	.....	.....
144	.....	.....	.....
145	.....	.....	.....
146	.....	.....	.....
147	.....	.....	.....
148	.....	.....	.....
149	.....	.....	.....
150	.....	.....	.....
151	.....	.....	.....
152	.....	.....	.....
153	.....	.....	.....
154	.....	.....	.....
155	.....	.....	.....
156	.....	.....	.....
157	.....	.....	.....
158	.....	.....	.....
159	.....	.....	.....
160	.....	.....	.....
161	.....	.....	.....
162	.....	.....	.....
163	.....	.....	.....
164	.....	.....	.....
165	.....	.....	.....
166	.....	.....	.....
167	.....	.....	.....
168	.....	.....	.....
169	.....	.....	.....
170	.....	.....	.....
171	.....	.....	.....
172	.....	.....	.....
173	.....	.....	.....
174	.....	.....	.....
175	.....	.....	.....
176	.....	.....	.....
177	.....	.....	.....
178	.....	.....	.....
179	.....	.....	.....
180	.....	.....	.....
181	.....	.....	.....
182	.....	.....	.....
183	.....	.....	.....
184	.....	.....	.....
185	.....	.....	.....
186	.....	.....	.....
187	.....	.....	.....
188	.....	.....	.....
189	.....	.....	.....
190	.....	.....	.....
191	.....	.....	.....
192	.....	.....	.....
193	.....	.....	.....
194	.....	.....	.....
195	.....	.....	.....
196	.....	.....	.....
197	.....	.....	.....
198	.....	.....	.....
199	.....	.....	.....
200	.....	.....	.....
201	.....	.....	.....
202	.....	.....	.....
203	.....	.....	.....
204	.....	.....	.....
205	.....	.....	.....
206	.....	.....	.....
207	.....	.....	.....
208	.....	.....	.....
209	.....	.....	.....
210	.....	.....	.....
211	.....	.....	.....
212	.....	.....	.....
213	.....	.....	.....
214	.....	.....	.....
215	.....	.....	.....
216	.....	.....	.....
217	.....	.....	.....
218	.....	.....	.....
219	.....	.....	.....
220	.....	.....	.....
221	.....	.....	.....
222	.....	.....	.....
223	.....	.....	.....
224	.....	.....	.....
225	.....	.....	.....
226	.....	.....	.....
227	.....	.....	.....
228	.....	.....	.....
229	.....	.....	.....
230	.....	.....	.....
231	.....	.....	.....
232	.....	.....	.....
233	.....	.....	.....
234	.....	.....	.....
235	.....	.....	.....
236	.....	.....	.....
237	.....	.....	.....
238	.....	.....	.....
239	.....	.....	.....
240	.....	.....	.....
241	.....	.....	.....
242	.....	.....	.....
243	.....	.....	.....
244	.....	.....	.....
245	.....	.....	.....
246	.....	.....	.....
247	.....	.....	.....
248	.....	.....	.....
249	.....	.....	.....
250	.....	.....	.....
251	.....	.....	.....
252	.....	.....	.....
253	.....	.....	.....
254	.....	.....	.....
255	.....	.....	.....
256	.....	.....	.....
257	.....	.....	.....
258	.....	.....	.....
259	.....	.....	.....
260	.....	.....	.....
261	.....	.....	.....
262	.....	.....	.....
263	.....	.....	.....
264	.....	.....	.....
265	.....	.....	.....
266	.....	.....	.....
267	.....	.....	.....
268	.....	.....	.....
269	.....	.....	.....
270	.....	.....	.....
271	.....	.....	.....
272	.....	.....	.....
273	.....	.....	.....
274	.....	.....	.....
275	.....	.....	.....
276	.....	.....	.....
277	.....	.....	.....
278	.....	.....	.....
279	.....	.....	.....
280	.....	.....	.....
281	.....	.....	.....
282	.....	.....	.....
283	.....	.....	.....
284	.....	.....	.....
285	.....	.....	.....
286	.....	.....	.....
287	.....	.....	.....
288	.....	.....	.....
289	.....	.....	.....
290	.....	.....	.....
291	.....	.....	.....
292	.....	.....	.....
293	.....	.....	.....
294	.....	.....	.....
295	.....	.....	.....
296	.....	.....	.....
297	.....	.....	.....
298	.....	.....	.....
299	.....	.....	.....
300	.....	.....	.....



第一章 工程热力学

热力学是研究热能和其他形式能量之间相互转换规律的学科。工程热力学是热力学的一个分支,是从工程应用的角度研究热能和机械能之间的相互转换规律。工程热力学是船舶轮机管理级船员必须掌握的轮机工程基础理论的重要内容之一。

第一节 基本概念

工程热力学研究的内容主要包括:热能与机械能相互转换的媒介物——工质的性质;热能与机械能相互转换的过程;提高热力设备和装置经济性的有效途径和方法。本节主要介绍工质、热力学系统、热力学平衡态、热力学状态参数、准静态过程和可逆过程等基本概念。掌握和运用这些概念,对工程热力学理论的研究和分析解决工程实际问题是十分重要的。

一、工质的概念及应用

在热动力装置中,热能与机械能的相互转换是通过媒介物实现的,这种媒介物称为工质。如往复式内燃机(图 1.1-1)的工质为燃气,蒸汽轮机动力装置(图 1.1-2)的工质为水和水蒸气,蒸气压缩制冷装置(图 1.1-3)的工质为制冷剂(R22、R134a 等)。作为工质的物质应具有良好的膨胀性和良好的流动性。因此,往复式内燃机的工质完全处于气态,而蒸汽动力装置和蒸气压缩制冷装置的工质在进行主要的热、功转换过程时(分别在汽轮机和压缩机中)也是处于气态。空气和燃气可当作理想气体看待,而水蒸气和制冷剂蒸气则是不可视为理想气体的实际气体。因此,研究和掌握工质的性质是十分必要的。

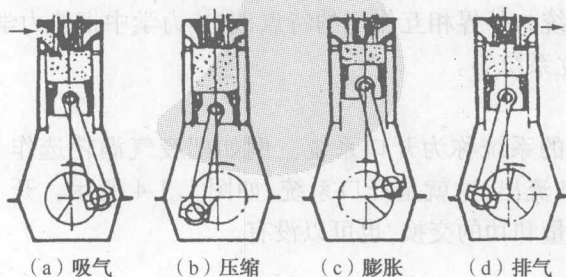


图 1.1-1 四冲程内燃机工作原理示意图

二、热力学系统

1. 热力学系统的概念

1) 系统

以图 1.1-2 所示的蒸汽轮机动力装置为例,其中的汽轮机、冷凝器和水泵等,从热力学的观点来看,都是相互作用的实现能量转换或传递的热力设备。为了进行热力学分析,首先要在相互作用的各种热力设备中划分一个(或几个)热力设备作为研究对象。在热力学中,这种被

划分出来的研究对象称为热力学系统,简称系统。

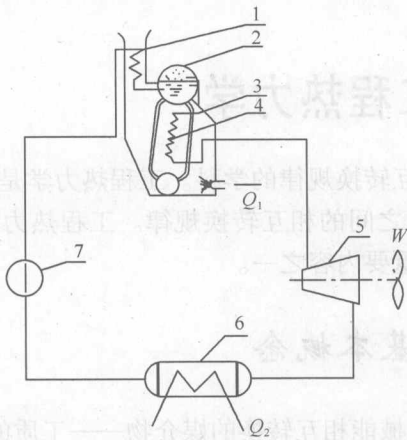


图 1.1-2 蒸汽轮机动力装置示意图

1—预热器;2—汽包;3—沸水管;4—过热
器;5—蒸汽轮机;6—冷凝器;7—水泵

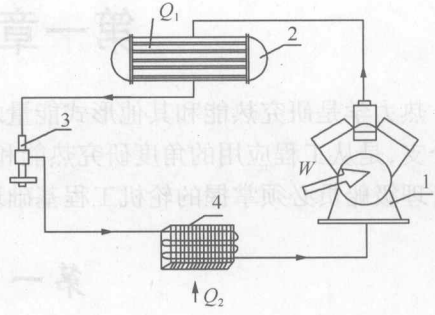


图 1.1-3 蒸汽压缩制冷装置示意图

1—压缩机;2—冷凝器;3—膨胀阀;4—蒸发器

2) 外界

热力学系统之外的其他热力设备统称为外界。

3) 边界

系统与外界的分界面称为边界。边界在图上通常用虚线标出,它可以是真实的(例如取压缩空气瓶内的空气为系统,瓶的内壁面就是真实的边界),也可以是设想的(例如取废气涡轮内的空间为系统,则进、出口处的边界是设想的)。

2. 热力学系统的分类及相互关系

1) 热力学系统的分类

一般情况下,热力学系统与外界的相互作用有三种:热力学系统与外界的物质交换、功交换和热量交换。按照系统与外界相互作用的特点,在热力学中把热力学系统分为开口系统、封闭系统、绝热系统和孤立系统等。

(1) 开口系统

与外界有物质交换的系统称为开口系统。例如把废气涡轮选作系统,它有工质的流入和流出,这就是开口系统,如图 1.1-4 所示。开口系统与外界可以有热量和功的交换,也可以没有。

(2) 封闭系统

与外界没有物质交换的系统称为封闭系统。例如把柴油机气缸中正进行膨胀的燃气选作系统,尽管燃气会从气缸与活塞的缝隙间漏泄一点,但漏泄量极小,可以足够精确地看做与外界没有物质交换,这就是封闭系统,如图 1.1-5 所示。封闭系统是由闭合表面包围的质量恒定的物质集合。封闭系统与外界可以有热量和功的交换,也可以没有。

(3) 绝热系统

与外界没有热量交换的系统称为绝热系统。图 1.1-4 所示的汽轮机若包以绝热材料,当

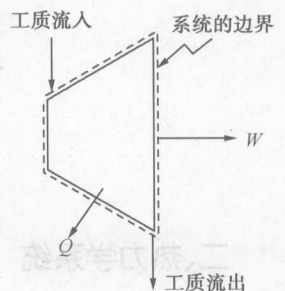


图 1.1-4 开口系统



工质流经汽轮机时,其散热量比传输给外界的功量小到可忽略不计时,则此开口系统可认为是绝热系统。又如图 1.1-5 中的燃气膨胀时有热量传给冷却水,若取燃气和冷却水(通常称为冷源)为系统,则包括燃气和冷却水在内的系统与外界没有热量交换,因而该系统为绝热系统,如图 1.1-6 所示。绝热系统与外界可以有物质和功的交换,也可以没有。

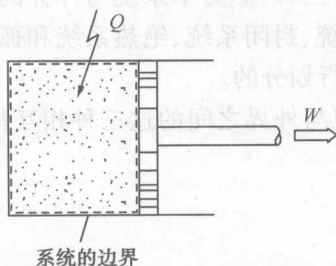


图 1.1-5 封闭系统

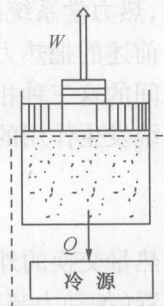


图 1.1-6 绝热系统

(4) 孤立系统

与外界既没有物质交换,也没有热量和功的交换的系统称为孤立系统。如果把所有发生相互作用的各种设备作为一个整体,并把这个整体选定为所研究的系统,虽然这个系统内部各部分可以有物质交换、热量和功的交换,但这个系统作为一个整体与外界没有任何相互作用,那么这个系统就是孤立系统。

2) 热力学系统的相互关系

在热力学中,把热力学系统分为开口系统、封闭系统、绝热系统和孤立系统,是根据热力学系统与外界之间有无物质交换、功交换和热量交换来进行划分的,不具有完全的排他性。任何一个热力学系统与外界之间都有可能没有物质的交换、有可能没有功的交换、有可能没有热量的交换,所以,一个热力学系统既可能是开口系统或封闭系统,也可能是绝热系统,也可能是孤立系统。

开口系统与外界之间一定有物质交换,但没有限制与外界之间是否一定有无热量和功的交换,所以,开口系统也可能是绝热系统(开口系统与外界之间无热量交换时)。但开口系统一定不会是封闭系统,也一定不会是孤立系统。

封闭系统与外界之间一定没有物质交换,但没有限制与外界之间是否一定有无热量和功的交换,所以,封闭系统也可能是绝热系统(封闭系统与外界之间无热量交换时),也可能是孤立系统(封闭系统与外界之间无热量和功的交换时)。但封闭系统一定不会是开口系统。

绝热系统与外界之间一定没有热量,但没有限制与外界之间是否一定有无物质和功的交换,所以,绝热系统也可能是封闭系统(绝热系统与外界之间无物质交换时),也可能是开口系统(绝热系统与外界之间有物质交换时),也可能是孤立系统(绝热系统与外界之间无物质和功的交换时)。

孤立系统与外界之间一定没有物质交换、热量交换和功的交换,所以孤立系统一定是封闭系统,也一定是绝热系统,但一定不是开口系统。

另外,在热力学分析中,热力学系统属于哪种系统,还与所选取的热力学系统的范围有关。如前所述,若把柴油机气缸中正进行膨胀的燃气作为一个热力学系统(如图 1.1-5 所示),则该热力学系统为封闭系统;若取燃气和冷却水(接收燃气膨胀时传递来的热量)作为一个热力学

系统(如图 1.1-6 所示),则该热力学系统为绝热系统,同时也是封闭系统;若取燃气、冷却水(接收燃气膨胀时传递来的热量)和接受燃气膨胀时所做的功的装置(通常称为功源)作为一个热力学系统,则该热力学系统为孤立系统,同时也是绝热系统和封闭系统。

3. 热力学系统与外界的相互作用

一般情况下,热力学系统与外界的相互作用有三种:热力学系统与外界的物质交换、功交换和热量交换。前述的把热力学系统分为开口系统、封闭系统、绝热系统和孤立系统,就是按照系统与外界之间的这三种相互作用的特点来进行划分的。

与热力学系统发生作用的外界,也可按照系统与外界之间的这三种相互作用的特点分为以下三种。

1) 热源

与系统进行热量交换的外界,称为热源。

实际热能装置(如动力装置、制冷装置等)的运行至少需要两个热源,通常把温度高的热源称为高温热源,简称热源;把温度低的热源称为低温热源,简称冷源。

动力装置从高温热源吸热,将吸热量的一部分放给低温热源,其余部分转变为机械功;而制冷装置则以消耗外界机械功为代价,从低温热源吸热(从而得到低于环境的温度),并将其与由功转变的热一起放给高温热源。

一般认为热源的热容量无限大,即其温度不因吸热或放热而变化。

在热力学分析中,可以有某一范围的温度连续变化的无穷多个高温热源和(或)低温热源。习惯上,系统从热源吸热为正值,系统向热源放热为负值。

2) 功源

与系统进行功的交换的外界,称为功源。

功源与封闭系统交换的功是直接通过系统中的工质膨胀或压缩引起的容积改变来实现的,称为“容积功”。

功源与开口系统交换的功通过转轴传递,称为“轴功”。

习惯上,系统对外界(功源)做功为正值,外界(功源)对系统做功为负值。

3) 质源

与系统进行物质交换的外界,称为质源。

三、热力学平衡态

1. 热力学平衡态的概念

为了对系统中能量转换的情况进行分析计算,首先需要对系统的热力学状态进行描述。在热力学中,把描述系统宏观特性的物理量称为“系统的热力学状态参数”,简称“状态参数”。为了简化对系统热力学状态的描述,只用很少几个状态参数来描述系统,从而提出了热力学平衡态这一重要概念。

这里先讨论两个具体例子。

在一个与外界隔热良好的量热器内,将冷热程度不同的水加以混合,冷水将变热,热水将变冷;经过足够长的时间,水的冷热程度便均匀一致,而且此后不随时间而变,则认为该系统处于热平衡。

再看一个例子,如图 1.1-7 所示,在与外界隔热良好的封闭气缸内用活塞将压力不同的两种气体 A 和 B 分隔开,设 A 的压力大于 B 的压力。若活塞与气缸间无摩擦,则活塞将向右移



动, A 的压力下降, B 的压力升高; 经过足够长的时间, A 和 B 便达到某一平衡压力, 活塞停止移动, 而且此后 A 和 B 将保持这一压力不变, 即该系统处于力平衡。

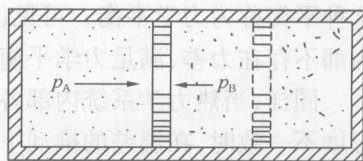


图 1.1-7 力平衡

对不发生化学反应的系统, 同时具备了热平衡和力平衡, 系统就处于“热力学平衡态”。处于热力学平衡态的系统, 只要不受外界的影响, 它的状态就不会随时间而改变, 平衡不会自发地破坏, 这是热力学平衡态的特点。

上面讨论的两个例子也说明了非平衡态若没有外界条件的影响, 总会自发地趋于平衡态的。系统的平衡态与非平衡态相比较, 前者的描述最为简单。这是因为: 其一, 平衡态与时间无关; 其二, 处于平衡态的系统, 其内部的压力和冷热程度都是均匀一致的。对应于系统的每一平衡态, 有一个而且只有一个压力和一个描述系统冷热程度的状态参数——温度。反之, 非平衡态则不仅与时间有关, 而且系统内部状态也是不均匀的, 因此, 描述系统的非平衡态极其复杂。大多数热力设备在稳定运行时所处的状态, 只要系统选得恰当, 均可看做平衡态。因此, 平衡态是工程热力学的一个重要的基本概念。工程热力学只讨论处于平衡态的系统。非平衡态热力学是一个专门的学科, 本书不作讨论。以后, 凡不致混淆时, 所提到系统的状态均指平衡态。

2. 热力学平衡态与稳态、均匀态的比较

1) 热力学平衡态与稳态的比较

若系统内的状态参数不随时间而变, 则该系统处于稳态。

通常, 处于稳态的系统不一定处于平衡态。

例如, 一根金属棒一端与热的电炉接触, 另一端与冷的冰接触, 当这根棒内任意一点的温度不随时间而变时, 则该系统处于稳态。但该系统内部各点的温度并不是均匀一致的, 因而处于非平衡态。既然处于非平衡态, 为什么各点温度不随时间而变呢? 这是因为系统与外界有热的相互作用。

2) 热力学平衡态与均匀态的比较

若封闭系统的各种状态参数在空间的分布都是均匀一致的, 则该系统称为均匀系统。

系统中每个均匀的部分称为“相”。所以, 均匀系统是由单相组成的。由两个或两个以上的相所组成的系统为非均匀系统。例如, 由水和水蒸气组成的系统就是两相的非均匀系统, 在两相(液相和气相)的分界面上, 密度发生突变。

在大多数情况下, 处于平衡态的系统为均匀系统。但非均匀系统在一定条件下也能处于平衡态。例如, 由水和水蒸气组成的两相系统, 在给定压力的条件下, 存在着一个对应的温度, 使水汽两相系统处于平衡态; 又如, 由冰、水和水蒸气组成的三相系统存在着唯一的一个平衡态, 这就是水的三相点(压力为 $0.000\ 611\ \text{MPa}$, 温度为 $0.01\ ^\circ\text{C}$)。

3. 热力学平衡态的判别

引起热力学系统状态变化的原因可能是外部的, 也可能是内部的。即使对没有外界影响的封闭系统而言, 只要系统中有压力差或冷热程度不均匀, 系统的状态就会自发地发生变化, 因而处于非平衡态。

力差或冷热程度不均匀是系统状态发生变化的推动力, 在热力学中称为“不平衡势”。

当热力学系统内部存在不平衡力时, 在力差(如压力差)的推动下, 系统内部各部分间将发生相对位移, 因而热力学系统的状态不可能保持不变, 只有不存在力差才有可能达到平衡,



这种平衡称为力学平衡。可见,力差是驱动热力学系统状态变化的一种不平衡势,热力学系统内部不存在力差,满足力学平衡,是热力学系统处于热力学平衡态的必要条件之一。

同样,当热力学系统内部各部分工质的冷热程度不均匀,即热力学系统内部各部分工质的温度不一致时,在温差的推动下,热量将自发地从高温处传向低温处,因而热力学系统的状态也不可能保持不变,只有不存在温差才有可能达到平衡,这种平衡称为热平衡。可见,温差是驱动状态变化的另一种不平衡势,热力学系统内部不存在温差,满足热平衡,是热力学系统处于热力学平衡态的另一个必要条件。

总之,热力学系统处于平衡态的条件就是系统内部不存在不平衡势。当热力学系统内部压力均匀一致,则系统处于力学或机械平衡状态;当热力学系统内部冷热均匀一致,则系统处于热平衡状态。在不发生化学反应的热力学系统内,如同时满足力学平衡条件和热平衡条件,则热力学系统处于热力学平衡态。

需要指出的是,不平衡势是驱动热力学系统状态变化的根本原因,而状态参数不随时间改变仅仅是表面现象。判断热力学系统是否处于热力学平衡态,必须从本质上进行分析,不能只看表面现象。

四、热力学状态参数

1. 热力学状态参数的概念及特性

1) 热力学状态参数的概念

在热力学中,把描述系统宏观特性的物理量称为“系统的热力学状态参数”,简称“状态参数”。

由前面的讨论可知,对于处于平衡态的任一系统,只需用确定的压力和温度等很少几个热力学状态参数来描述它。

在工程热力学里,常用的热力学状态参数有六个,即压力(压强) p 、温度 T 、容积(体积) V 、内能(热力学能) U 、焓 H 和熵 S 。工程热力学里之所以引用这些状态参数,是因为它们全部直接或间接地与系统的能量或能量转换有关。

工程上把可直接观察和测量的热力学状态参数称为基本状态参数,它们是压力(压强) p 、温度 T 、容积(体积) V 。

2) 热力学状态参数的特性

热力学状态参数的数值由热力学系统的状态唯一确定。

当热力学系统的状态发生变化时,若变化的初态和终态是确定的,则系统的各状态参数的变化量也是确定的,与状态变化过程的性质无关。

不同的状态参数描述系统不同的特征。系统的状态参数依照其特性可分为两类:“尺度量”和“强度量”。

尺度量是描述系统总体特征的状态参数,如系统的容积 V 、内能 U 、焓 H 和熵 S 等,其数值为系统中各部分数值的总和,具有可加性。

对于均匀系统,尺度量的数值与系统的质量成正比。

强度量是描述系统内各点特征的状态参数,如系统的压力 p 、温度 T 、比容(单位质量的容积) v 、比内能(比热力学能,即单位质量的热力学能) u 、比焓(单位质量的焓) h 、比熵(单位质量的熵) s 等,其数值与系统的质量无关,具有不可加性。

对于均匀系统,强度量的数值在空间的分布是均匀一致的。在非平衡态的系统中,强度量



的数值在空间的分布不是均匀一致的,如压力差和温度差,这就是不平衡势。

3) 热力学状态参数的充分与必要条件

热力学状态参数的数值由系统的状态唯一确定。当系统从初态变为终态时,状态参数的变化量,只与系统的初、终状态有关,而与变化的途径无关。因此,状态参数是系统状态的单值函数或点函数,状态参数的微元变量是全微分。这是判断某一参数是否为状态参数的充分和必要条件。

在热力学中,还有一类参数,它们的变化量不仅与系统的初、终状态有关,而且与变化的途径有关。这类参数不是状态参数,而是路径函数,它们的微元变量不是全微分。功和热量是这类参数的例子。

2. 常见的热力学状态参数和基本的热力学状态参数

在工程热力学里,常用的热力学状态参数有六个,即压力(压强) p 、温度 T 、容积(体积) V 、内能(热力学能) U 、焓 H 和熵 S 。其中,压力 p 、温度 T 和容积 V 是可直接观察和测量的热力学状态参数,称为基本状态参数。

下面对常用的六个状态参数分别加以介绍。

1) 压力

在工程热力学中,把工质指向系统表面(真实的容器壁或假想的分界面)单位面积上的垂直作用力,称为压力(即压强)。分子运动论把气体压力看做是气体分子撞击壁面的宏观表现。实际上,容器内的气体分子非常之多,撞击也非常频繁,因此就产生了一个持续的有一定大小的压力,这个压力就是大量分子撞击壁面的平均结果。按分子运动论的观点,气体压力等于单位容积内的分子数与分子的平均动能乘积的 $2/3$ 。

(1) 压力的单位

压力 p 的单位是由压力的定义式来确定的:

$$p = \frac{P}{f}$$

式中, P 为工质指向表面的垂直作用力, f 为表面面积。由于力 P 和面积 f 选用的单位不同,压力单位也不同。根据《中华人民共和国法定计量单位》(简称法定单位)规定,力 P 的单位为牛顿(N),面积 f 的单位为平方米(m^2),压力的单位则为牛顿/平方米(N/m^2),称为“帕”,符号为Pa。由于Pa这一单位所表示的压力太小,实际应用时可用MPa(10^6 Pa)作为压力的单位。

(2) 大气压力

大气压力是由地面上几百公里高的空气层的重量引起的,以符号 p_b 表示。大气压力的大小随纬度、高度以及空气的温度和水蒸气含量而变化。历史上,物理学中把纬度 45° 平均海平面上常年大气压力的平均值定为标准大气压,以符号atm表示。现已规定 $1 \text{ atm} = 0.101325 \text{ MPa}$ 。

(3) 表压力、真空度、绝对压力

系统的压力可用压力表测定,并以大气压力作为测量的基准。由压力表测得的压力数值称为“表压力”,以 p_g 表示。系统的实际压力数值称为“绝对压力”,以 p 表示。用压力表测得的压力数值不是绝对压力,而是绝对压力与当地大气压力的差值,即

$$p_g = p - p_b \quad (1.1-1)$$

例如,在图1.1-8的排出管上,用U形管压力计测得的排出压力:

$$p_g = \rho gh = 0.00196 \text{ MPa}$$



就是排出管中空气的绝对压力与当地大气压力之差。如用气压计测出当地大气压力

$$p_b = 0.10132 \text{ MPa}$$

则其绝对压力

$$p = p_g + p_b = 0.00196 + 0.10132 = 0.10328 \text{ MPa}$$

对于绝对压力低于当地大气压力的系统,其表压力将为负值。工程上用“真空度”来表示这种表压力的绝对值,以符号 p_v 表示。可见,真空度 p_v 是当地大气压力与绝对压力的差值,即

$$p_v = p_b - p \quad (1.1-2)$$

例如,在图 1.1-8 的吸入管上,用 U 形管真空计测得的吸入真空度

$$p_v = \rho gh = 0.00098 \text{ MPa}$$

就是吸入管中空气的绝对压力比当地大气压力低的数值,其绝对压力

$$p = p_b - p_v = 0.10132 - 0.00098 = 0.10034 \text{ MPa}$$

表压力和真空度是以当地大气压力为基准的相对压力,前者表示比大气压力高的压力值,后者表示比大气压力低的压力值,如图 1.1-9 所示。由于当地大气压力是会变化的,作为系统的状态参数应该是绝对压力,而不是表压力或真空度。

在工程计算中,当 $p_g \gg p_b$ 时,由于当地大气压力变化不大,可近似认为 $p_b = 0.1 \text{ MPa}$,则

$$p = p_g + 0.1 \text{ MPa} \quad (1.1-3)$$

但当被测压力较小,其数值与当地大气压力相近时,则不能将大气压力看做常数,而应测定大气压力的具体数值。

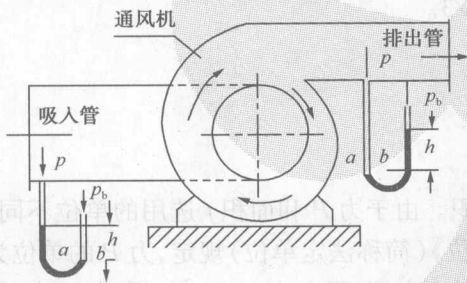


图 1.1-8 吸入管和排出管中的压强

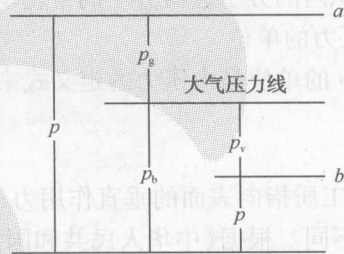


图 1.1-9 表压强、真空度和绝对压强的关系

2) 温度

(1) 温度的概念

从热力学角度来看,温度是描述热平衡物体宏观特性的物理量。

人们通常用温度来表示物体冷热的程度,感觉越热,温度越高;反之,感觉越冷,温度越低。

从分子运动论看,物体温度与组成该物体的分子能量有关,随着温度升高,分子运动加剧。具体来说,温度与物体内分子的平均动能成正比。这符合通常所观察到的热现象。比如,有两个具有不同分子平均动能的物体相接触,由于接触面分子相互碰撞的结果,能量就由分子平均动能较大的物体传递给平均动能较小的物体,直到两个物体的平均动能相等为止。换句话说,就是高温物体把热量传递给低温物体,直到两者温度相等时热传递才停止。可见,温度的微观本质就是物体内部分子和原子不规则热运动的度量,物体温度越高,其内部分子的热运动就越剧烈。



(2) 温标

要定量地确定温度,必须对不同的温度给以具体的数量标示。温度的数值表示方法叫做温标。

常用的温标有以下三种:

① 摄氏温标 在标准大气压力下,纯水的冰点规定为 0 度,沸点为 100 度,在这两点之间均分为 100 等份,取其中的 1 份称为摄氏 1 度,记作:1°C,摄氏温标用符号°C 表示。

② 华氏温标 在标准大气压力下,纯水的冰点规定为 32 度,沸点为 212 度,在这两点之间均分为 180 等份,取其中的 1 份称为华氏 1 度,记作 1°F,华氏温标用符号°F 表示。

③ 热力学温标 热力学温标又称绝对温标,也称开氏温标,它是以摄氏零下 273.15 度作为绝对温标的零度,每度的间隔与摄氏温标相同,1 度记作 1 K,开氏温标用符号 K 表示。

大部分国家应用摄氏温标,英、美等国家采用华氏温标,工程热力学计算中常用绝对温标,因此必须掌握它们之间的换算。

根据上述三种温标的定义,如果已知摄氏温度为: $t^{\circ}\text{C}$,则相当于华氏温度为

$$t^{\circ}\text{F} = \frac{9}{5}t^{\circ}\text{C} + 32 \quad (1.1-4)$$

若已知华氏温标为 $t^{\circ}\text{F}$,则相当于摄氏温度为

$$t^{\circ}\text{C} = \frac{5}{9}(t^{\circ}\text{F} - 32) \quad (1.1-5)$$

若已知摄氏温度为 $t^{\circ}\text{C}$,则绝对温度为

$$TK = t^{\circ}\text{C} + 273.15 \quad (1.1-6)$$

若摄氏温度为 45°C ,则华氏温度为 $t^{\circ}\text{F} = 9 \times 45^{\circ}\text{C} / 5 + 32 = 113^{\circ}\text{F}$ 。若华氏温度为 -40°F ,则摄氏温度 $t^{\circ}\text{C} = 5 \times (-40^{\circ}\text{F} - 32) / 9 = -40^{\circ}\text{C}$

3) 容积和比容

一定质量的工质所占有的空间称为工质的容积(体积),用 V 表示,单位是立方米(m^3)。单位质量工质的容积称为比容(比体积),用符号 v 表示,单位为立方米/千克(m^3/kg)。容积和比容均为工质的热力学状态参数。

设质量为 m 千克的工质所占容积为 V 立方米,则其比容为

$$v = \frac{V}{m} \quad (1.1-7)$$

一立方米工质所具有的质量称为密度,用符号 ρ 表示,单位为千克/立方米(kg/m^3)。

设 V 立方米工质的质量为 m 千克,则其密度为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.1-8)$$

由以上两式可知,比容 v 和密度 ρ 互为倒数,即

$$\rho = \frac{1}{v} \quad \text{或} \quad v = \frac{1}{\rho}$$

4) 内能和比内能

物质内部具有多种能量,如由原子结合成为分子的化学能、原子内部的原子能,以及分子无规则运动的热能等。

工程热力学研究的是热能与机械能之间的相互转换,因此把工质所具有的热能称为内能(热力学能),用符号 U 表示,单位是焦(J)或千焦(kJ)。单位质量工质的内能称为比内能(比



热力学能),用符号 u 表示,单位是焦/千克(J/kg)或千焦/千克(kJ/kg)。可见

$$u = \frac{U}{m} \quad (1.1-9)$$

工质的内能是由分子无规则热运动所具有的内动能(包括分子的平动动能、转动动能及分子内部原子的振动动能)和分子间相互作用力产生的内势能两部分组成。前者是温度的函数,后者取决于容积(或比容),因此,工质的内能(或比内能)是温度和容积(或比容)的函数,即

$$U = \Phi(T, V) \quad \text{或} \quad u = \phi(T, v) \quad (1.1-10)$$

由此可见,工质的内能(或比内能)是由状态参数——温度和容积(或比容)所决定的,因此内能 U 和比内能 u 也为工质的热力学状态参数。

在热力学的计算中,往往只用到内能 U 或比内能 u 的变化量,因此,它们为零值的基准态可以人为地选定。

5) 焓和比焓

工质在流经开口系统时,由于其比内能 u 和压力 p 与比容 v 的乘积(称为比流动功) pv 总是同时出现,因此,在热力学中把这两者之和称为比焓,用符号 h 表示,单位是焦/千克(J/kg)或千焦/千克(kJ/kg),即

$$h = u + pv \quad (1.1-11)$$

对于 m 千克处于平衡态的工质,则有

$$H = mh = mu + pmv = U + pV \quad (1.1-12)$$

式中, H 称为 m 千克工质的焓,单位是焦(J)或千焦(kJ)。

因为 U 、 u 、 V 、 v 和 p 均为工质的状态参数,因此,焓 H 和比焓 h 也为工质的热力学状态参数。在热力学的计算中,往往只用到焓 H 或比焓 h 的变化量,因此,它们为零值的基准态可以人为地选定。

6) 熵和比熵

在一个微元可逆过程(将在下节介绍)中, m 千克工质从热源吸收的微元热量 dQ 除以工质吸热时热源的绝对温度 T 所得的商,定义为工质在绝对温度 T 时熵 S 的增量 dS ,即

$$dS = \left(\frac{dQ}{T}\right)_{\text{rev}} \quad (1.1-13)$$

熵 S 的单位是千焦/开(kJ/K)或焦/开(J/K)。

对于均匀系统,令 $dQ = mdq$,将式(1.1-13)两边除以 m 得

$$ds = \left(\frac{dq}{T}\right)_{\text{rev}} \quad (1.1-14)$$

s 为单位质量工质的熵,称为比熵,单位是千焦/(开·千克)[kJ/(K·kg)]或焦/(开·千克)[J/(K·kg)]。 dq 为单位质量工质从热源吸收的微元热量,单位是千焦/千克(kJ/kg)或焦/千克(J/kg)。熵和比熵均为工质的热力学状态参数。

若可逆过程工质从状态 1 变为状态 2,其熵和比熵的变化量为

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \left(\frac{dQ}{T}\right)_{\text{rev}} \quad (1.1-15)$$

$$\Delta s = s_2 - s_1 = \int_1^2 \left(\frac{dq}{T}\right)_{\text{rev}} \quad (1.1-16)$$

“熵”字的中文意义是热量被温度除所得的“商”,熵(Entropy)的希腊原名的意义是“转