

全国中等水产学校教材

工程热力学与 制冷原理

河北水产学校 主编

制冷专业用

农业出版社

(京)新登字060号

TK123
8.7A

全国中等水产学校教材
工程热力学与制冷原理

河北水产学校 主编

* * *

责任编辑 陈力行

农业出版社出版 (北京市朝阳区农展馆北路2号)
新华书店北京发行所发行 农业出版社印刷厂印刷

787 × 1092mm 16开本 16印张 3插页 365千字

1992年5月第1版 1992年5月北京第1次印刷

印数 1—2,300册 定价 4.50元

ISBN 7-109-02072-X/TH·99

前 言

全国中等水产学校试用教材《制冷原理》自1980年出版后，为国内水产、商业系统各中等专业学校制冷工艺专业所普遍采用，曾得到不少兄弟院校同仁们的肯定和鼓励。本书是在原教材的基础上，遵照1988年农业部水产局组织制订的四年制中专《工程热力学与制冷原理》教学大纲重新改编而成。在改编过程中，我们根据多年来的教学实践和制冷学科的进展，对原教材进行了较大的增删和修订。

全书共分两篇十章，主要阐述了工程热力学的基础知识及以蒸汽压缩式制冷机为主的人工制冷原理的理论知识，保持了原教材精简扼要、说理清楚、图文并茂和便于自学的特点。除作为制冷工艺专业的教材外，本书也可供制冷工程技术人员、高级技工和有关专业的师生参考。

本书由河北水产学校制冷教研组周志云担任主编，编写绪论、第二篇和收集整理附录的图表；沈振华编写第一篇的第一至五章；赵剑华编写第一篇的第六章。全书由周志云统改定稿。

本书承上海水产大学食品科学系冯志哲教授审稿，并提出了宝贵意见，在此谨致深切的谢忱。

由于编者的水平所限，书中定有许多不妥和错误之处，恳切希望读者不吝批评指正。

编 者

1990.8.

11-03/57

主编 河北水产学校 周志云
协编 河北水产学校 沈振华 赵建华
审稿 上海水产大学 冯志哲

目 录

绪论	1
----	---

第一篇 工程热力学基础

第一章 基本概念	5
第一节 热力系统	5
第二节 热力系统的描述	6
第三节 基本状态参数	7
第四节 准静态过程和可逆过程	13
第五节 功、热量和熵	15
第六节 热力循环	19
习题	21
第二章 热力学第一定律	21
第一节 热力学第一定律	21
第二节 内能	22
第三节 闭口系统能量方程式	24
第四节 开口系统稳定流动能量方程式	26
第五节 稳定流动能量方程式的应用	29
习题	32
第三章 理想气体及气体热力过程	33
第一节 理想气体及状态方程	33
第二节 理想气体的比热	37
第三节 理想气体的内能、焓和熵	40
第四节 理想混合气体	43
第五节 理想气体的热力过程	51
第六节 气体的压缩	62
习题	64
第四章 热力学第二定律	65
第一节 自然过程的不可逆性	65
第二节 热力学第二定律的表述	66
第三节 卡诺循环、卡诺定理	68
第四节 孤立系统的熵增原理	71
第五节 热的可用性与能量贬值	72
第六节 状态参数焓	74
习题	78
第五章 蒸汽的性质	79

第一节	液汽两相的转变过程	80
第二节	蒸汽的产生	81
第三节	蒸汽热力性质表和图	84
第四节	蒸汽的基本热力过程	87
第五节	气体和蒸汽的节流	89
	习题	92
第六章	湿空气	93
第一节	概述	93
第二节	湿空气的状态及状态参数	94
第三节	湿空气的焓湿图 (h—d图)	98
第四节	焓湿图的应用	99
第五节	湿空气状态变化的过程	105
	习题	109

第二篇 制冷原理

第七章	制冷的的方法	111
第一节	概说	111
第二节	蒸汽压缩式制冷	112
第三节	蒸汽吸收式制冷	112
第四节	蒸汽喷射式制冷	115
第五节	空气膨胀制冷	117
第六节	热电式制冷	119
第七节	涡流管制冷	122
	实验一 制冷的的方法	123
第八章	制冷剂与载冷剂	124
第一节	制冷剂的种类	124
第二节	对制冷剂的要求	127
第三节	常用制冷剂及其性质	130
第四节	制冷剂的选用	133
第五节	载冷剂 (冷媒)	134
第九章	单级蒸汽压缩式制冷循环	141
第一节	单级蒸汽压缩式制冷的理论循环	142
第二节	单级蒸汽压缩式制冷的实际循环	146
第三节	液体制冷剂的过冷、蒸汽的过热及回热循环	148
第四节	单级蒸汽压缩式制冷循环的热力计算	153
第五节	制冷工况	158
第六节	影响制冷循环的因素	161
第七节	某些制冷循环的特性	168
第八节	制冷系统运行情况在压焓图上的表示	172
	习题	175
	实验二 蒸汽压缩式制冷装置制冷量的测定	176
第十章	两级蒸汽压缩式制冷循环与复叠式制冷循环	177

第一节	采用多级压缩的原因	177
第二节	两级压缩制冷循环	179
第三节	两级蒸汽压缩式制冷循环的热力计算	187
第四节	复叠式制冷循环	198
第五节	复叠式制冷循环的热力计算	201
	习题	205
附录		207
附表 1	理想气体摩尔比热公式	207
附表 2	气体的平均比热直线关系式	207
附表 3	R717饱和状态下的热力性质	208
附表 4	R12饱和状态下的热力性质	214
附表 5	R22饱和状态下的热力性质	218
附表 6	R13饱和状态下的热力性质	222
附表 7	氯化钠水溶液的热物理性质	226
附表 8	氯化钙水溶液的热物理性质	227
附表 9	单级氨压缩机制冷量换算系数A	229
附表10	立式和V、W型单作用氨压缩机 λ 值	230
附表11	两级压缩低压级氨压缩机的 λ 值	230
附表12	单级压缩氨单位容积制冷量	231
附表13	两级压缩氨单位容积制冷量	231
附表14	R12的单位容积制冷量	232
附表15	R22的单位容积制冷量	233
附表16	R22两级压缩机 ($\xi = 1:3$) 的 $t_m(p_m)$ 近似值	234
附表17	R12 (R22) 压缩机的 λ 值	234
附表18	R12 (R22) 两级压缩低压级的 λ 值	235
附表19	氨压缩机排汽温度	235
附表20	R717过热蒸汽的热力性质	236
附图 1	氨 (R717) Lgp-h图	247
附图 2	R13 Lgp-h图	248
附图 3	R22 lgp-h图	249
附图 4	R12 lgp-h图	250
附图 5	湿空气的h-d图	251

绪 论

一、制冷与制冷技术的发展概况 冷和热是我们在日常生活和工业生产中经常遇到的一类物理现象。一个比环境温度高的物体，在放置过程中由于物体内热量的散失（传给了环境介质，如大气等），它会渐渐地冷却，但是不可能冷到低于周围环境的温度；因此，这类自然冷却现象不是制冷。所谓制冷，是指用人为的方法从物体中取出热量，使它的温度降低到比环境介质更低的温度，并在一定的时间内维持这个温度的过程。

实现制冷有两个途径，即利用天然冷源或人工制冷。利用冰雪或地下水等天然冷源简便易行，缺点是受到季节和地区的限制，又不易控制和调节，而且一般不能获得低于 0°C 的温度，故使用的范围有限。人工制冷又叫“致冷”，它以消耗机械能或其它能量为代价，使某空间内物体降到并维持低于环境温度。制冷技术即指研究人工制冷的原理、方法、装备及其应用的科学技术。人工制冷中所需机器和设备的总和称为制冷机。制冷机中使用的工作物质称为制冷工质或制冷剂。

国际上通常把1755年作为人工制冷史的起点，在这一年格拉斯哥大学的化学教授威廉·库仑(William Cullen, 苏格兰人)完成了第一台实验室制冷设备，可以在真空罩下使水降压蒸发而制得少量的冰。他的学生约瑟夫·布拉克(Joseph Black)在1761年从本质上解释了融化和汽化现象，引用了潜热的概念，并澄清了热量、温度、比热的概念，创建了量热学。

1834年，在伦敦定居的美国人雅各·波尔金斯(Jacob Perkins)发明了第一台可液化气体(乙醚)的压缩式制冷机。1844年，美国医生约翰·高里(John Gorrie)发明了空气循环式制冷机，为发烧病患者建立了一座空调站。1859年法国人菲迪南特·卡雷(Ferdinand Carre)发明了氨吸收式制冷机。1873年美国人戴维·波义尔(David Boyle)制造了第一台单作用、立式单缸氨压缩机。德国人卡尔·冯·林德(Carl von Linde)的第一台氨压缩机是在1876年诞生的，后来他又作了很大的改进，使制冷效率和制造质量有了很大提高。当时最常用的还是吸收式制冷机和空气循环式制冷机，10年以后，即到188⁵年，蒸汽压缩式制冷机开始占了优势。1886年，德国人弗朗士·文德豪森(Franz Windhausen)制造了二氧化碳压缩机，由于二氧化碳的无害性，使它在船上获得应用达50余年之久，直到1955年才被完全淘汰。在19世纪，资本主义各国对人工制冷的需要量大大增加，促进了制冷技术的进步。

进入20世纪后，制冷机器设备实现了工业化生产，真正的制冷工业到1914年开始形成，并逐步向多品种、低温化、大型化与自动化发展，制冷技术的应用范畴也大大扩展。1908年，马利斯·莱兰克(Maurice Leblanc)发明了蒸汽喷射式制冷系统。1930年出

现了氟利昂制冷剂，这类制冷剂的使用又推动了制冷技术的革新。近30年来，各种共沸混合工质和非共沸混合工质陆续问世，又为蒸汽压缩式制冷机的发展开辟了新的道路。进入50年代后，由于半导体技术的发展，使1834年法国物理学家珀尔帖（Peltier）发现的金属温差电效应有了实用价值，温差电制冷（热电制冷）成了一种新型冷源。近年来，电子计算机技术已渗透到制冷工程的辅助设计、辅助测试、自动控制和生产管理等方面，制冷技术的蓬勃发展已达到空前未有的高度。

二、制冷技术在国民经济中的应用 与人民生活密切有关的食物工业是最早应用制冷技术的部门。由于肉类、水产品、禽蛋、果蔬等易腐食品的生产有着较强的季节性和地区性，为了调剂旺淡季节、保障供给、支援出口，就需要将食品进行冷藏或冻藏，来延长食品的贮藏期限。目前，在商业流通网中已逐渐形成了易腐食品的（生产—贮存—运输—分配—消费）冷链，它由一系列固定的（冷库）和流动的（冷藏车船）冷藏设施组成。冷库的服务范围也已扩大到保存贵重皮毛、服装、药材、花卉栽培、蚕种冬眠等方面。此外，制冷还应用于谷物贮藏及冷饮品、饮料、啤酒等的生产。

农业上要获得粮棉油和经济作物的增产，施用化肥是一项有效措施，而生产合成氨要使用制冷机。又如，低温种子库（ 0°C 、 -5°C 及 -15°C ）可用于贮存原始品种和优良品种的种子；用液氮可保存生物体的细胞和组织、保存种畜精液（10年以上仍然有效）。渔获物保鲜；海带、紫菜的育苗；微生物除虫；人造雨雪等也无一不是制冷在农牧渔业中应用的实例。

在工业方面，制冷技术的应用更为广泛。每炼1t钢约需 50m^3 的氧气，而氧气则是用深冷空气分离技术获得的。石油化学工业为合成橡胶、塑料、化纤提供了乙烯、丙烯等原料气，在石油裂解气的分离过程中就需要用大冷量的制冷机。其它如石油脱腊、石油产品精炼以及在有机合成、基本化工生产方面也都要用到制冷技术。

在冶金、纺织、印刷、精密仪表、电子工业、照相材料等工厂，在某些实验室、试验中心及检量室，为了保证必要的恒温和恒湿的工作条件，需要进行空气调节，而制冷则是空调装置中不可缺少的组成部分。舒适性空气调节工程则广泛应用于大会堂、剧院、宾馆、饭店、博物馆、医院等公共场所以及水陆空交通工具中。

在医药卫生方面，血库和皮肤库（ -40°C — -80°C 低温箱）早有使用；对一些热敏性物质（细菌、病毒、酶、抗菌素等）则可用冷冻真空干燥法保存。另外，局部冷冻可使病变组织坏死脱落以达到治疗目的，临床证明它对内痔、慢性宫颈炎、某些皮肤病、浅表良性或恶性肿瘤等疾病有良好疗效。

在挖掘矿井、隧道和修筑船坞、堤坝、水闸时，或在地下水位很高的地区、沼泽地带施工时均可采用人工制冷来冻结土壤以利施工。

近二十年以来，制冷技术已应用到尖端科学的许多部门，如低温超导、航天技术与空间科学、战略武器、红外技术、激光等。特别是微型制冷器的研制应用，辅助了尖端科学的飞速发展。例如红外遥感的探测器体积很小，几千万列阵的探测器只有一颗纽扣大小，而又严格地需要在低温下工作（ -80°C — 3K ），这就要有与之匹配的微型制冷器。它的特

点除了尽可能微小外，还要求重量轻、功耗小、冷却时间极短（几秒钟）、不维修的寿命长和工作可靠等。就拿响尾蛇导弹来说，它所用红外制导部分中的制冷器只有6g重。

总之，制冷技术已进入现代化工农业生产、科研、文化教育、国防的每一个领域，并展现出无限璀璨的前景。

三、我国制冷事业的发展简史 我国是世界闻名的文明古国，我国人民曾为人类社会的进步做出了卓越的贡献。早在3000多年前，我们的祖先就懂得采集天然冰用于食物的冷藏。《诗经》里有一首诗描述了奴隶在寒冬腊月凿取冰块、并贮存在冰窖（凌阴）里的情景，可说是世界上有关利用天然冷源的最古老的记载之一。春秋战国时代，冬藏夏用的冰房几乎各国都有，且有专职人员（凌人）管理。到了封建社会，用冰制冷的技术又有发展。《邶中记》一书载有三国时曹操在临漳县设井藏冰的故事，提到了一个空前规模的地下冰库：“有屋一百四十间，下有冰室，室有数井，井深十五丈……”，这在1700多年前堪称世界第一，实在是件很了不起的壮举。唐朝鼎盛时期，冰的应用已从官府普及到民间，夏季冰雪供应紧张，一时身价百倍，以至出现了“长安冰雪，至夏月则价等全璧”的情况。据说只有诗人白居易凭他妇孺皆知的盛名，冰店才给予免费取用的优待。此外，在《齐民要术》中记载着农业上用雪水拌种，增强种子的抗寒性，以改良种子和提高产量。直到13世纪以后，我国冰藏鲜肉和制作冰酪冷食的技艺才流传到西方，这在意大利传教士马可·波罗（Marco Polo）撰写的游记中可以找到佐证。

但是，由于我国漫长的封建社会导致了社会生产力发展的缓慢，制冷技术也长期处于停滞不前的状态。解放前，我国人民在三座大山的压迫下，由于政治腐败、经济落后，工农业生产面貌残破不堪。那时全国冷库的容量只有30kt左右，也谈不上有什么制冷机制造工业和制冷专业教育。

中华人民共和国成立后，在中国共产党的英明领导下我国国民经济飞速发展，制冷事业也获得了新生。制冷机制造工业从无到有，从小到大，从仿制到自行设计，经历了从创业到发展的道路。我国从1954年起造出了制冷压缩机，到1958年已有了很大发展。1964年以来，活塞式制冷压缩机、蒸汽喷射式制冷机、溴化锂吸收式制冷机、离心式制冷机先后都形成了系列，螺杆式制冷压缩机、半导体制冷器的研制生产均有了可喜的进展，全国冷库的库容量也有很大增长。

党的十一届三中全会后，经过全党全国人民的艰苦努力，胜利实现了历史性的伟大转变，我国经济走上了稳步发展的健康轨道。随着经济体制的改革和社会主义经济的全面高涨，大力发展制冷技术已成了经济振兴和建设四个现代化的迫切需要。目前，机械制造、商业、水产等部门都有专业或兼业的制冷机制造厂家，大小四十多个，品种和产量都达到了新的水平。商业、外贸、水产、供销、农（牧）工商系统的冷库库容量已超过3500kt，比解放初期增长了约百余倍。

在制冷专业教育方面，高等工科院校动力系设有从事设计制造制冷机的制冷和低温技术专业，商业、水产、海运院校设有从事制冷装置设计和管理的制冷工艺专业，各地水产、商业中等专业学校也设有制冷专业，它们为我国培养着大批各级制冷专门人才。专业

的科研设计单位也不少，如合肥通用机械研究所、商业部设计院、中国水产科学研究院、上海船舶设计院、铁道科学院运输所、轻工业部设计院、化工部化工研究所等。有关的专业学会有中国制冷学会、中国水产学会的渔业制冷专业委员会、中国建筑工程学会、中国造船工程学会、中国化学工程学会和中国食品工程学会等。多年来它们积极组织制冷与相关学科的科学研究和学术交流，为发展我国制冷技术起了巨大的促进作用。国内发行的期刊则有《流体工学》、《通用机械文摘》、中国水产科学研究院渔业机械研究所主办的《渔业机械仪器》、中国制冷学会主办的《制冷学报》、第三专业委员会的《冷藏技术》、上海市制冷学会的《制冷技术》、四川省制冷学会的《四川制冷技术》、广东省制冷学会的《广东制冷》等等。

当前，我国正加速发展农村的商品经济，而冷库是商品流通必需的基础设施之一。依靠国家、集体和个人的力量，采取多种办法集资，在集镇、乡村有计划地兴建各类小型冷库，不仅可满足广大农（牧、渔）民和经济组织对贮藏、保鲜、加工、运销农林牧渔产品的要求，为发展商品生产、繁荣农村经济服务，也将改变冷库的原有布局，为我国制冷事业的发展揭开崭新的一页。

四、本课程的性质、研究内容和要求 《工程热力学与制冷原理》是水产中等专业学校四年制制冷专业的主要课程，它起着从专业基础课向专业课过渡的桥梁作用。本课程的研究内容包括工程热力学基础知识与普通冷冻温度范围内人工制冷的一般原理。本课程主要讲授工程热力学的基础知识及以蒸汽压缩式制冷机为主的人工制冷原理的理论知识。通过本课程的学习，要求学生具备热力学第一定律、热力学第二定律和热力过程的基本概念，了解蒸汽、湿空气的性质，重点掌握蒸汽压缩式制冷的原理，学会使用有关的制冷工质图表进行制冷循环的热力计算，为学习后续专业课程奠定坚实的理论基础。

第一篇 工程热力学基础

第一章 基本概念

第一节 热力系统

工程热力学是研究热功转换规律的一门科学。在热能动力装置中，是依靠热机中工作物质的吸热和放热以及它本身的状态变化完成热功转换的。这种工作物质简称工质，通常是蒸汽和气体。

在热力学研究和分析中，首先要确定研究对象，并把它与其它周围的物体分开，然后研究这个物体上所受的作用。这个研究对象可以是固定的一些物体，也可以是固定在空间中的一些物体。这种在能量转换时被划出的部分称为热力系统或简称系统。热力系统以外的物体统称为外界或环境。热力系统和外界的分界面称为边界或界面。

当然，这个外界系指与热力系统有关的其它物体。一般情况下热力系统与外界处于互相作用中，彼此可交换能量和物质。热力系统可以由一种物质组成，也可以由多种物质组成。边界可以是真实的，也可以是假想的，可以是固定的，也可以是运动的。

若一个热力系统与外界只有热量和机械功交换，而无物质交换，这样的系统称为闭口系统。如图1-1-1所示，气缸中的工质因受热膨胀而推动活塞做功。这时可取工质为一个热力系统，活塞、重物及热源为外界。当工质膨胀做功时，系统的边界随活塞一起移动，这说明边界是可以移动的。但工质不能越过边界而流出系统，同时也没有外界物质流入系统。若一个热力系统与外界既有热量和机械功的交换，同时又有物质的交换，这样的系统称为开口系统。如图1-1-2所示，有一个燃气轮机，燃气由进口流入，在气轮机中膨胀并推动叶轮对外做功，然后从出口排出。气轮机工作过程中，不但有工质推动叶轮做功对外输出，还不断有工质流入进口和流出出口。如果选择进口和出口作为边界的一部分，那么对于取气轮机和进出口截面所包围的气体为研究对象的热力系统来说，与外界不但有功量交换，同时还有物质交换，这个系统属于开口系统。进出口截面作为边界的一部分，这部分界面是假想的，并不是实际存在的。

按照热力系统与外界有无能量交换，它又可分为简单热力系统、绝热系统和孤立系统。如果热力系统与外界只交换热量和一种形式的功，即称为简单热力系统。例如压气机系统和外界只有热量和压缩功的交换，可称为简单可压缩系统。如果一个热力系统与外界无热量交换，这样的系统称为绝热系统。例如外面包有隔热材料的容器，系统内的工质与外界不能交换热量，可视为绝热系统。如果热力系

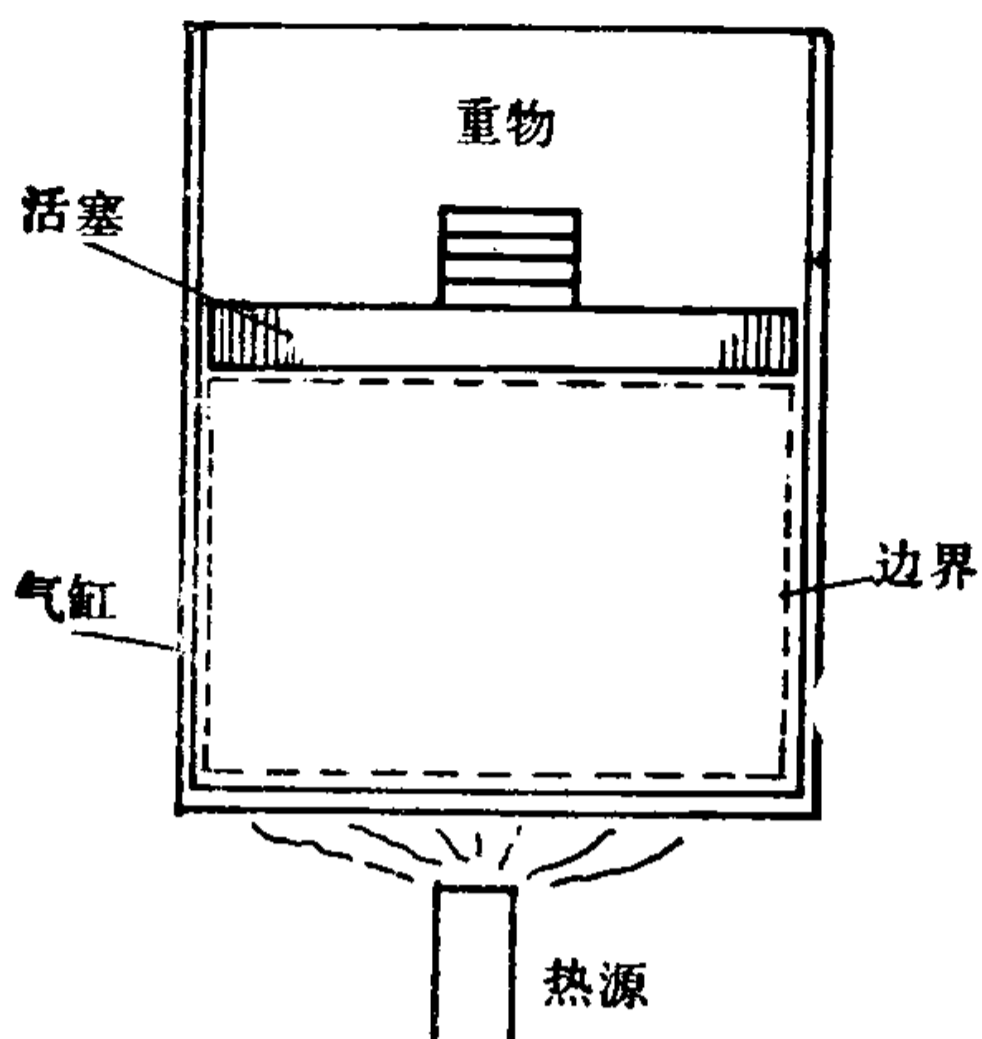


图 1-1-1 闭口系统

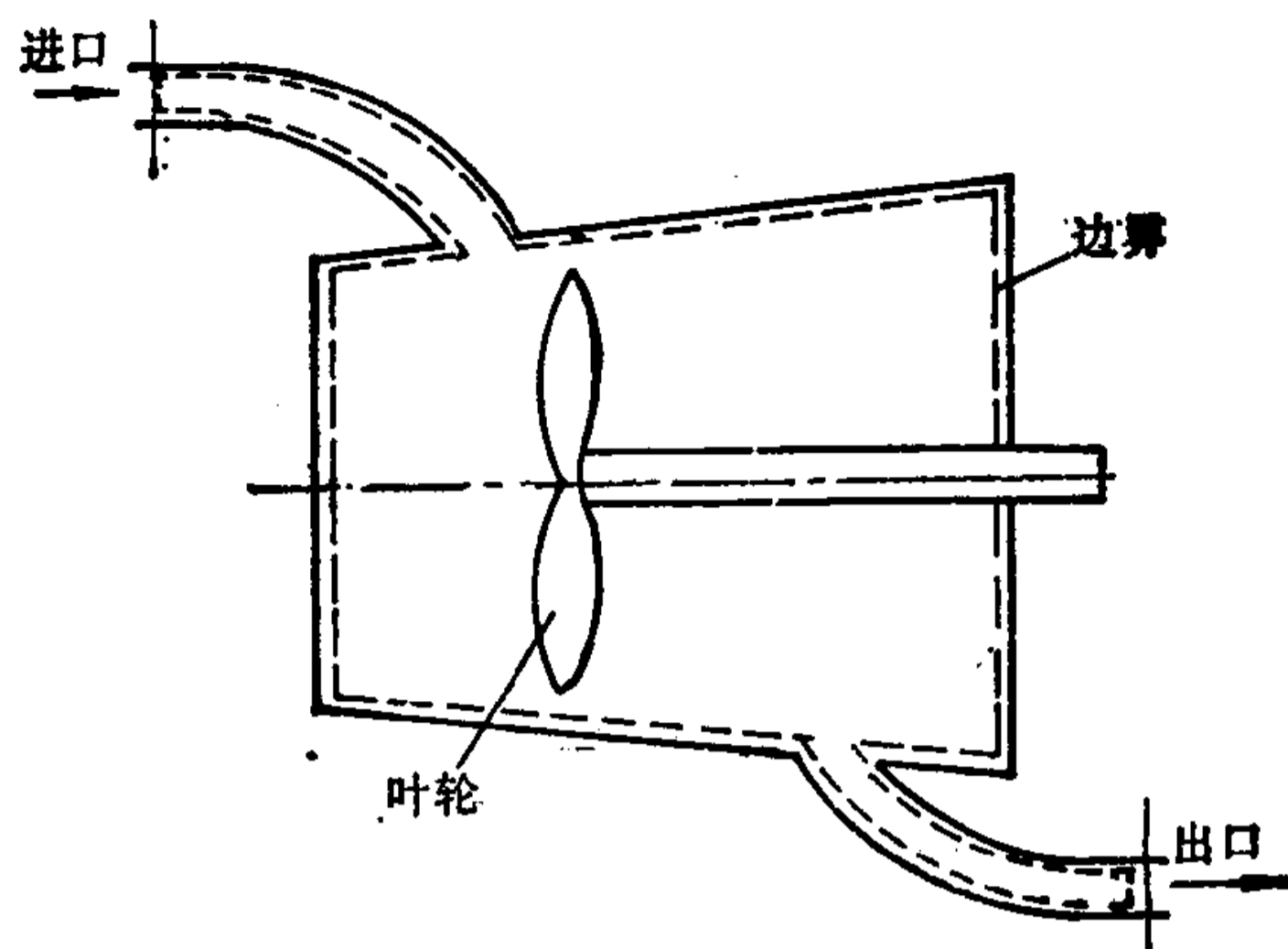


图 1-1-2 开口系统

这样的系统称为孤立系统。孤立系统的选取是为了分析问题的方便而人为确定的，事实上一个完全孤立的系统是不存在的。

第二节 热力系统的描述

在热力设备中，是依靠工质从热源（供给工质热量的物质）吸热及对外膨胀作功而实现热功转换的，此时工质本身也在不断地发生变化。在制冷设备中，则依靠制冷工质从被冷却物体中吸热并接受外功而实现制冷的，这时制冷工质也不断地变化。为了说明热力设备或制冷设备中的热功转换过程，就必须研究过程中工质状态发生的变化。热力学中把工质所处的某种宏观状况称为工质的热力状态，简称状态。工质的状态常用一些物理量来描述，这些物理量称为状态参数。工质的状态通常用压力、温度、比容、比内能、比焓和比熵来描述，其中压力、温度和比容是可以直接测得的，称为基本状态参数。状态参数的数值仅取决于工质的状态，而与达到这种状态所经历的过程无关。状态变化了，状态参数也随着改变，状态一经确定，状态参数也就有了确定的数值。

工质的状态就是系统所呈现的宏观物理状态，有时是不变的，有时是瞬间万变的。这种瞬间万变的系统，有瞬间万变种状态参数，在工程热力学中不是我们研究的对象。我们感兴趣的是一种所谓的平衡状态。平衡状态是指在没有外界影响的条件下，物体的各部分长时间内不发生变化。没有外界的影响是指系统与外界没有能量和物质的交换。

处于平衡状态的热力系统，各处有均匀一致的压力、温度……，这是很容易理解的。如果热力系统内各部分物体温度不一致时，当有温差的物体互相接触时，必然有热量从高温物体传向低温物体，这时系统就不会维持状态不变，原来温度较高的物体温度会下降，原来温度较低的物体温度会上升，最终达到一致的温度，没有温差存在。所以平衡系统必须具有相同的温度，否则，只要有温差存在就会有不平衡状态，系统就不会长时间保持不变。同样道理，如果系统中有不平衡力的作用，则会引起物体宏观的位移，也会使系统状

态不断发生变化，直至力差的消失。所以平衡系统必须达到力平衡。由此可见，系统处于平衡状态，必须使系统达到力平衡和热平衡两个条件。

状态参数是状态的单值函数，热力系统的状态一定，状态参数的数值也一定。在任意过程中，热力系统从初态 1 变化到终态 2 时，状态参数的变化量均等于初终状态下该状态参数的差值，而与过渡过程如何进行无关。即

$$\int_1^2 dx = x_2 - x_1 \quad (\text{式1-1-1})$$

式中 x ——表示任意状态参数。

当热力系统经历一封闭状态变化过程又回到原始状态时，其状态参数的变化量当然为零。

即

$$\oint dx = 0 \quad (\text{式1-1-2})$$

可见，状态函数的微分是全微分。对于只有两个独立参数的热力系统，可以任选两个参数构成直角坐标。热力系统任一平衡状态都可以在参数坐标图上找到一个确定的点与之相对应。例如用压力表示纵座标，比容表示横座标组成的 $p-v$ 图；以温度 T 表示纵座标，熵 s 表示横座标的 $T-s$ 图，在工程上都得到广泛应用（如图 1-1-3）。

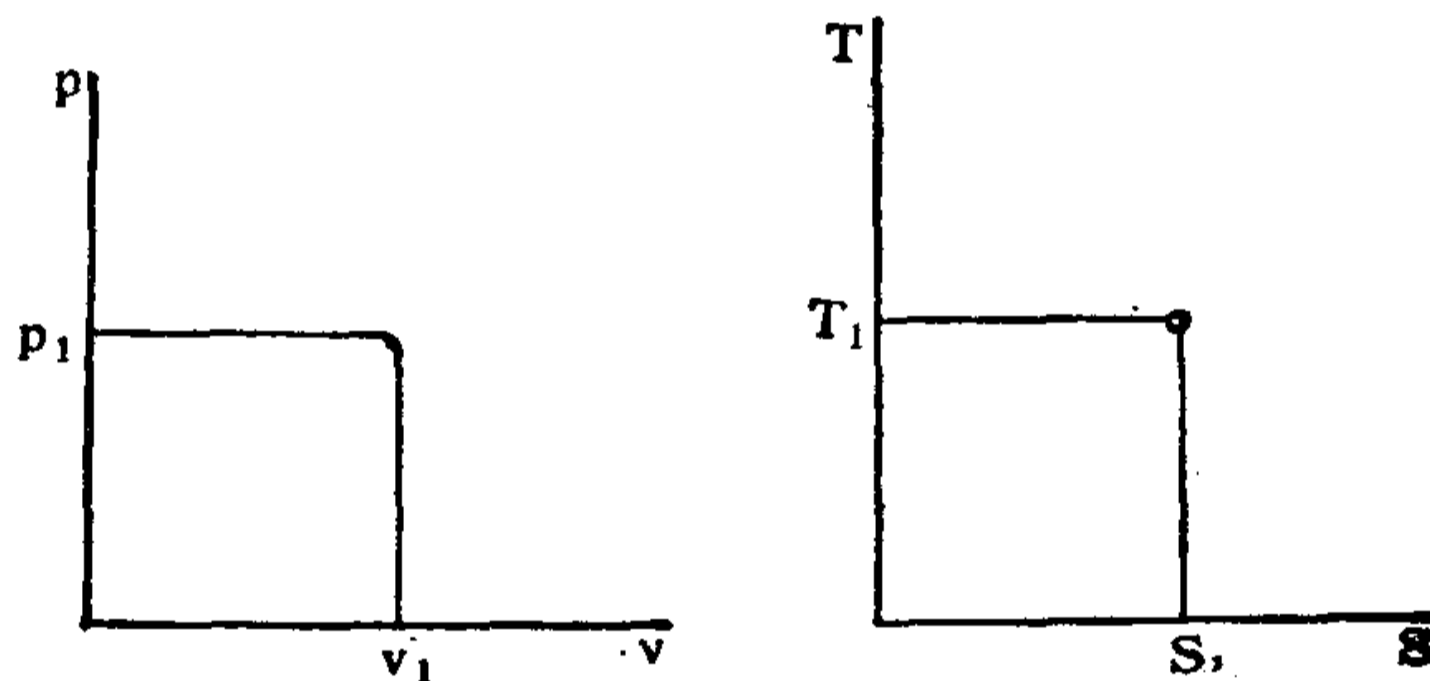


图 1-1-3 $p-v$ 图和 $T-s$ 图

对于非平衡状态，由于 p 、 T 、 v 都没有一定的数值，它们就不可能在 $p-v$ 图或其它图上找到一个对应点。

$p-v$ 图又称为示功图， $T-s$ 图也称为示热图。

第三节 基本状态参数

简单可压缩系统处于平衡状态时常用基本状态参数比容 v 、压力 p 、和温度 T 来描述。

一、比容、密度和重度 单位质量的物质所占有的容积称为比容，用符号 v 表示，其单位为 m^3/kg 。按定义可得：

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

式中 m ——物质的质量， kg 。

V —— $m\text{kg}$ 物质所占有的容积， m^3 。

单位容积内工质的质量称为密度，用符号 ρ 表示，其单位为 kg/m^3 。按定义可得

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{kg}/\text{m}^3$$

不难看出，比容和密度互为倒数，即

$$v = \frac{1}{\rho} \quad \text{或} \quad \rho v = 1 \quad (\text{式1-1-4})$$

工程中有时常用到重度这一概念。重度是单位容积内所含物质的重量。用符号 γ 表示，单位为 N/m^3 。按定义可得

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad \text{N}/\text{m}^3 \quad (\text{式1-1-5})$$

式中 G ——物质的重量， N 。

V —— G 牛顿物质所占有的容积， m^3 。

由牛顿第二定律 $G = mg$ 得

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{mg}{V} = \rho g \quad (\text{式1-1-6})$$

式中 g ——重力加速度，通常取 $g = 9.81 \text{m}/\text{s}^2$ 。

V —— G 牛顿物质所占有的容积。

二、压力 压力在工程热力学中是一个压强的概念，不是力的概念。气体分子运动理论把气体的压力看作是分子撞击容器内壁的结果。气体的压力就是大量气体分子无规则运动对容器壁面频繁撞击的平均结果。气体的压力与气体的分子数目及分子运动速度有关，可用下式表示：

$$p = \frac{2}{3} n_0 \frac{m\omega^2}{2} \quad (\text{式1-1-7})$$

式中 n_0 ——单位容积内分子的数目。

m ——每个分子的质量。

ω ——气体分子运动的平均速度。

$\frac{m\omega^2}{2}$ ——分子平均移动动能。

式1-1-7说明单位面积上容器所受的气体压力是单位容积内所含分子平均移动动能的三分之二。

压力是单位面积上所受到的垂直作用力，用符号 p 表示，在国际单位制中压力的单位是牛顿/米²，记作 N/m^2 ，根据定义可得

$$p = \frac{F}{A} \quad \text{N}/\text{m}^2$$

式中 F ——垂直作用于面积 A 上的作用力， N 。

A ——面积， m^2 。

压力单位 N/m^2 称为Pa。此单位在工程上应用太小，故常用MPa表示。
在工程中，压力有时用bar作单位。

$$1\text{bar} = 10^5\text{Pa}$$

工程上常用的压力计有两种，一种是弹簧管式压力计，另一种是测量微小压力的U形管压力计。弹簧管压力计是利用弹簧在内外压差作用下产生变形拨动指针转动指示工质与环境之间压力差的。它的结构如图1-1-4所示。U形管压力计一端与被测介质相连，另一端与大气相通。当介质压力与大气压力不相等时，就会产生一定的液柱高度差，由U形管两端产生的高度差即可读出介质与大气的压力差值。U形管压力计如图1-1-5所示。

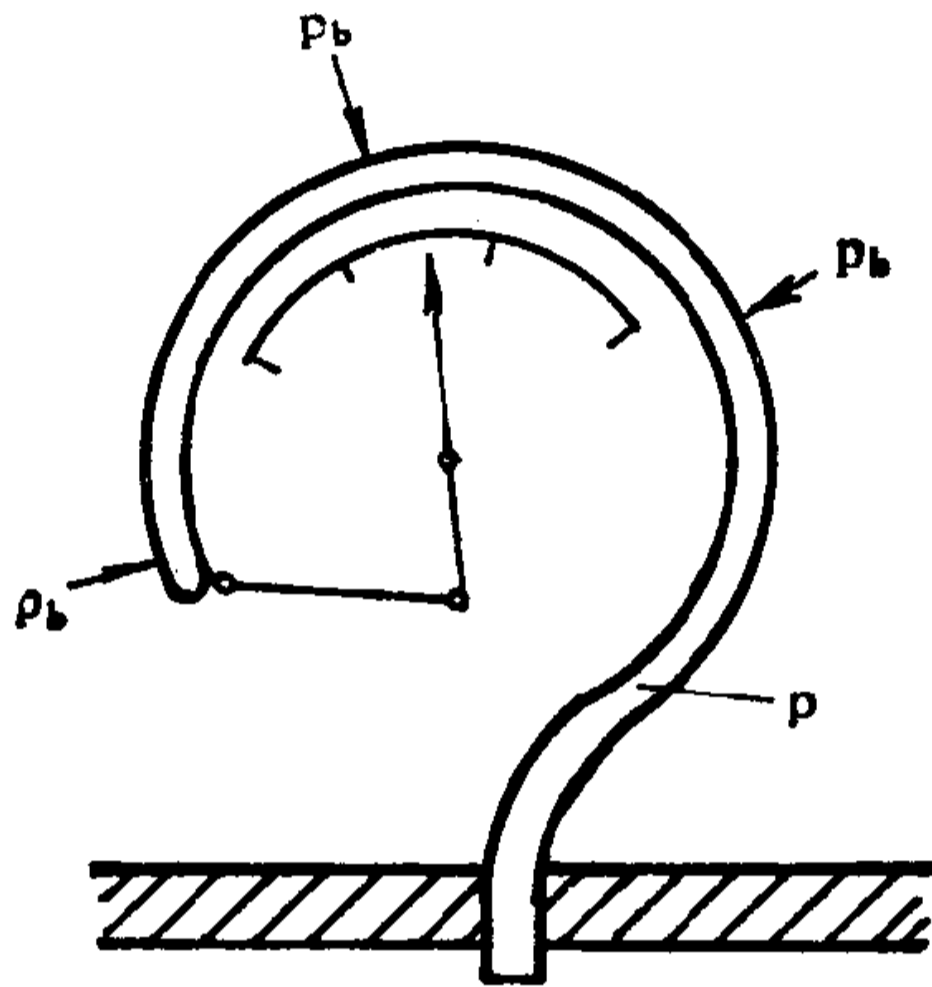


图 1-1-4 弹簧管压力计结构图

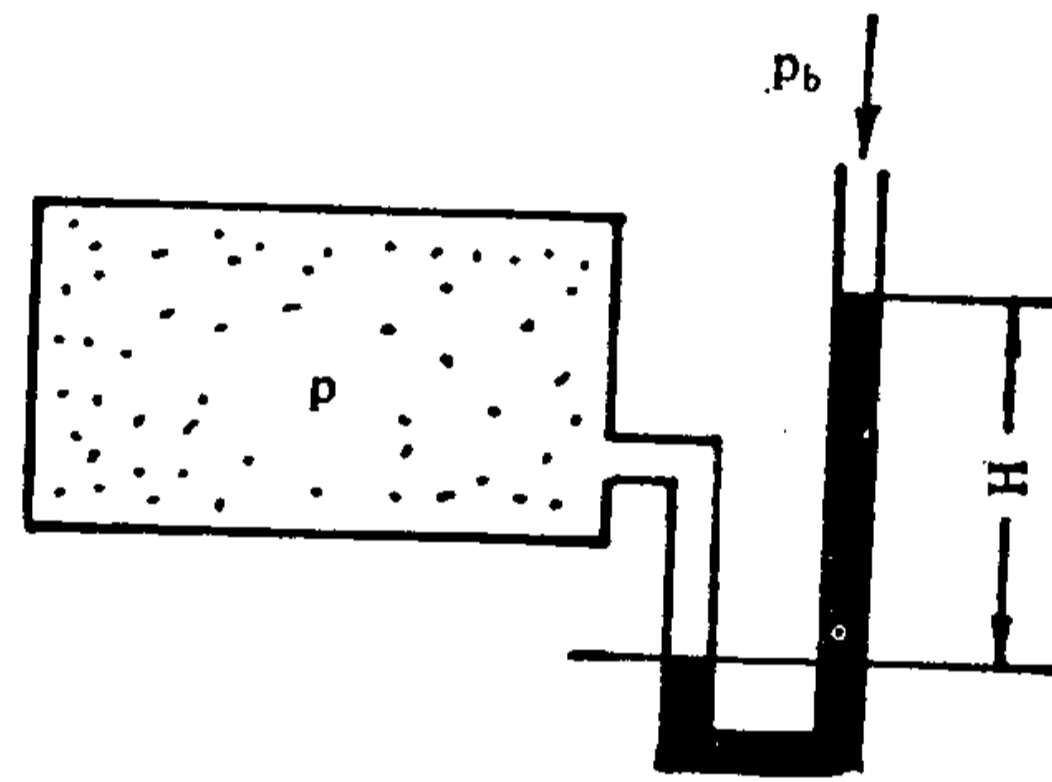


图 1-1-5 U形管压力计

根据连通器原理，连通器内同一高度具有相同的压力。我们可取A—A截面，在这个面上的压力是相同的。U形管A—A平面左边压力是工质的压力，右边的压力等于大气压力和液柱高度产生的压力之和，写出等式如下

$$p = p_b + \gamma H = p_b + \rho g H$$

或

$$H = \frac{p - p_b}{\gamma} = \frac{p - p_b}{\rho g} \quad (\text{式1-1-8})$$

式中 p ——被测介质的压力， N/m^2 。

p_b ——大气压力， N/m^2 。

γ ——测压液体的重度， N/m^3 。

ρ ——测压液体的密度， kg/m^3 。

H ——U形管两边液柱高度差， m 。

g ——重力加速度，取 $9.81m/s^2$ 。

由1-1-8式可知，如果将液体的重度 γ 看成常数， $p - p_b$ 的数值与液柱的高度有直接的关系，一定的液柱高度就代表了一定的压差数值。

工程上常用的测量压力的液体有水银和水，分别取 0°C 和 4°C 的水银和水的重度为：

$$\gamma_{\text{Hg}} = 13.595 \times 9.81 \times 10^3 \text{N/m}^3$$

$$\gamma_{\text{H}_2\text{O}} = 9.81 \times 10^3 \text{N/m}^3$$

在工程单位制中，压力的单位是 kgf/m^2 ，由于这个单位太小，常用 kgf/cm^2 表示

$$1 \text{kgf/cm}^2 = 10^4 \text{kgf/m}^2$$

工程上又称 1kgf/cm^2 为一个工程大气压 (at)，

$$1 \text{kgf/cm}^2 = 1 \text{at}$$

大气压力 p_b 是由于地面上几百公里高的空气柱的重量造成的压力。它的大小随各地的地点、高度和气候条件而变化，在当时当地测得的大气压称为当地大气压。物理学上规定在纬度 45° 的海平面上常年平均大气压力为标准大气压 (atm) 或称为物理大气压，其值为 $760 \text{mmHg}(0^\circ\text{C})$ 。

少数欧美国家习惯用 lbf/in^2 做压力单位。有关压力单位之间的换算关系为

$$\begin{aligned} 1 \text{bar} &= 10^5 \text{Pa} = 750.06 \text{mmHg} = 10.1972 \text{mH}_2\text{O} \\ &= 1.02 \text{at} = 14.5 \text{lbf/in}^2 \\ 1 \text{at} &= 1 \text{kgf/cm}^2 = 10^4 \text{kgf/m}^2 = 10 \text{mH}_2\text{O} \\ &= 735.6 \text{mmHg} = 9.81 \times 10^4 \text{Pa} = 0.981 \text{bar} \\ 1 \text{atm} &= 1.013 \times 10^5 \text{N/m}^2 = 1.013 \text{bar} = 1.03323 \text{at} \\ &= 760 \text{mmHg} = 10.332 \text{mH}_2\text{O} \\ 1 \text{mmHg} &= 133.32 \text{Pa} \\ 1 \text{mmH}_2\text{O} &= 9.81 \text{Pa} \end{aligned}$$

在工程计算中，大气压力可近似地取为

$$p_b = 1 \text{bar} \text{ 或 } p_b = 1 \text{at}$$

被测介质的真实压力称为绝对压力，用 p 表示。测量仪表所测得的值不是介质的真实压力。用压力表测得的压力值是比当时当地大气压高出的数值，所以压力表测得的压力称为表压力，用 p_g 表示。那么，绝对压力、表压力及大气压力之间的关系可用下式表示

$$p = p_g + p_b \quad (\text{式1-1-9})$$

式中 p ——绝对压力。

p_g ——表压力。

p_b ——大气压力。

当气体的压力低于大气压力时，用真空表测量的压力是低于大气压力的数值，称为真空度，用 p_v 表示。绝对压力与真空度之间的关系可用下式表示

$$p = p_b - p_v \quad (\text{式1-1-10})$$

由于大气压力是随地点、时间、气候条件不断变化的，即使介质的绝对压力不变，从式1-1-9和式1-1-10也可看出，由于大气压力的变化，表压力和真空度也随之改变。所以，表压力和真空度是不能代表工质

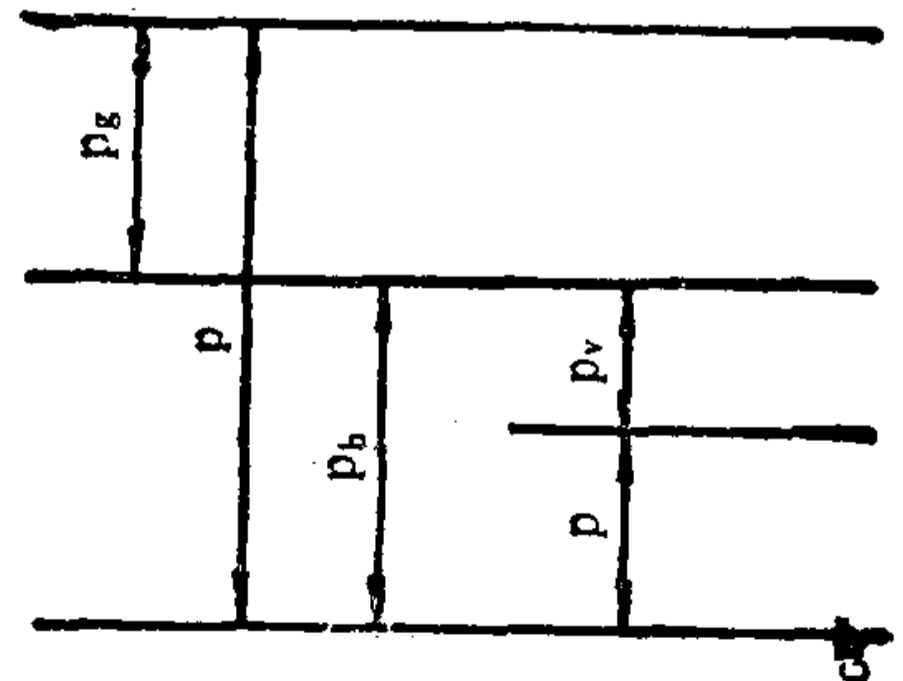


图 1-1-6 绝对压力、表压力、真空度示意图