



注册公用设备工程师考试 专业基础课精讲精练

暖通空调及动力专业

赵静野 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



注册公用设备工程师考试 专业基础课精讲精练

暖通空调及动力专业

赵静野 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

《注册公用设备工程师（暖通空调及动力专业）执业资格考试基础考试大纲》内容分为公共基础和专业基础两部分。本书紧扣专业基础部分考试大纲，由北京建筑工程学院有相关课程教学和实践经验丰富的教师编写，具有较强的指导性和实用性。本书包括工程热力学、传热学、工程流体力学及泵与风机、自动控制、热工测试技术和机械基础六章内容，并附有相应的复习题及答案与提示，以提高考生复习备考的效率。在书的最后，还附两套模拟试题，以帮助考生检验复习效果。

本书适用于参加 2013 年度公用设备（暖通空调及动力专业）工程师执业资格专业基础考试人员。

图书在版编目（CIP）数据

2013 注册公用设备工程师考试专业基础课精讲精练·暖通空调及动力专业 / 赵静野主编. —北京：中国电力出版社，2013.3

ISBN 978 - 7 - 5123 - 4192 - 0

I. ①2… II. ①赵… III. ①采暖设备 - 建筑设计 - 工程师 - 资格考试 - 自学参考资料②通风设备 - 建筑设计 - 工程师 - 资格考试 - 自学参考资料③空气调节设备 - 建筑设计 - 工程师 - 资格考试 - 自学参考资料 IV. ①TU8

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2013）第 050275 号

中国电力出版社出版发行

北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑：梁 瑶 电话：010 - 63412605

责任印制：蔺义舟 责任校对：郝军燕

北京市铁成印刷厂印刷·各地新华书店经售

2012 年 4 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm × 1092mm 1/16 · 26.5 印张 · 636 千字

定价：65.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

本书是按照 2003 年 5 月开始实行的《注册公用设备工程师执业资格制度暂行规定》和《勘察设计注册公用设备工程师制度总体框架实施规划》的规定，以最新《全国勘察设计注册公用设备工程师暖通空调及动力专业基础考试大纲》的专业基础部分为依据，组织相关课程富有经验的教师编写的。

本书内容包含工程热力学、传热学、工程流体力学及泵与风机、自动控制、热工测试技术和机械基础等六章内容。考试大纲要求的职业法规部分，因为有具体的法律、规范和标准文件，无须再作为精讲内容，故未包含在本书中。参加本书编写的人员及分工如下：

第 1 章 工程热力学	邱 林
第 2 章 传热学	许淑惠
第 3 章 工程流体力学及泵与风机	赵静野
第 4 章 自动控制	马鸿雁
第 5 章 热工测试技术	郝学军
第 6 章 机械基础	王跃进

考虑到考生要在有限的时间内复习多门课程，本书对大学教材中的内容进行了提炼、归纳，精选重要复习题并附有解题指导，注重精炼、够用和高效。本书中的模拟试题（二），是收集的 2012 年注册公用设备工程师专业基础课考试真题，对其进行了详细讲解，以供读者参考。

本书可作为注册公用设备工程师暖通空调及动力专业基础考试的复习资料，也可作为高等院校建筑环境与设备工程及相关专业师生的参考用书。

在编写过程中，得到了北京建筑工程学院老师的大力支持，王幼新、黄厚坤、王偲、高宇欣、高小钠、周玉芝、任少博、何承福、李贤妮、周明连、张玉梅、王硕、刘铜、李旻等人也对本书的编写工作提供了帮助。在此表示感谢！

受编者学识所限，加之时间仓促，不足和错误之处恳请广大读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第 1 章 工程热力学	1
考试大纲	1
1.1 基本概念	1
1.1.1 热力学系统	1
1.1.2 状态	2
1.1.3 平衡 (平衡状态)	2
1.1.4 状态参数	2
1.1.5 状态公理	2
1.1.6 状态方程式	2
1.1.7 热力参数及坐标图	2
1.1.8 功和热量	3
1.1.9 热力过程	3
1.1.10 热力循环	3
1.1.11 单位制	4
1.2 准静态过程、可逆过程与不可逆过程	4
1.2.1 准静态过程	4
1.2.2 可逆过程与不可逆过程	5
1.3 热力学第一定律	5
1.3.1 热力学第一定律的实质	5
1.3.2 内能	5
1.3.3 焓	5
1.3.4 热力学第一定律在闭口系统和开口系统的表达式	6
1.3.5 系统的储存能	6
1.3.6 稳定流动能量方程及其应用	8
1.4 气体性质	9
1.4.1 理想气体模型及其状态方程	9
1.4.2 实际气体模型及其状态方程	10
1.4.3 压缩因子	10
1.4.4 临界参数	10
1.4.5 对比态定律	11
1.4.6 理想气体的比热容、内能及焓	11
1.4.7 混合气体	12
1.5 理想气体基本热力过程及气体压缩	13
1.5.1 定压、定容、定温和定熵过程	13

1.5.2	多变过程	14
1.5.3	压气机的压缩轴功	16
1.5.4	余隙	18
1.5.5	多级压缩及中间冷却	18
1.6	热力学第二定律	19
1.6.1	热力学第二定律的实质及表述	19
1.6.2	卡诺循环和卡诺定理	19
1.6.3	熵	21
1.6.4	孤立系统熵增原理	21
1.7	水蒸气和湿空气	23
1.7.1	蒸发、冷凝、沸腾和汽化	23
1.7.2	水蒸气的定压发生过程	24
1.7.3	水蒸气图表	25
1.7.4	水蒸气的基本热力过程	26
1.7.5	湿空气的性质	26
1.7.6	湿空气的焓湿图	28
1.7.7	湿空气的基本热力过程	29
1.8	气体和蒸汽的流动	30
1.8.1	稳定流动基本方程	30
1.8.2	定熵流动的基本特性	31
1.8.3	喷管中流速及流量计算	32
1.8.4	绝热节流	33
1.9	动力循环	34
1.9.1	蒸汽动力基本循环——朗肯循环 (Rankine Cycle)	34
1.9.2	回热、再热循环	35
1.9.3	热电循环	36
1.9.4	内燃机循环	36
1.10	制冷循环	37
1.10.1	空气压缩制冷循环	38
1.10.2	蒸汽压缩制冷循环	39
1.10.3	吸收式制冷循环	40
1.10.4	热泵	41
1.10.5	气体的液化	42
	复习题	42
	复习题答案与提示	47
第2章	传热学	52
	考试大纲	52
2.1	导热理论基础	52

2.1.1	导热基本概念	52
2.1.2	傅里叶定律	53
2.1.3	导热系数	53
2.1.4	导热微分方程	54
2.1.5	导热过程的单值性条件	55
2.1.6	小结	56
2.2	稳态导热	56
2.2.1	通过平壁的导热	56
2.2.2	通过圆筒壁的导热	57
2.2.3	临界热绝缘直径	59
2.2.4	通过肋壁的导热	59
2.2.5	通过接触面的导热	60
2.2.6	二维稳态导热问题	61
2.2.7	小结	61
2.3	非稳态导热	61
2.3.1	非稳态导热的特点	61
2.3.2	对流换热边界条件下非稳态导热	61
2.3.3	常热流密度边界条件下非稳态导热	63
2.3.4	小结	64
2.4	导热问题数值解	64
2.4.1	有限差分法原理	64
2.4.2	建立离散方程的方法	64
2.4.3	稳态导热问题的数值计算	65
2.4.4	非稳态导热问题的数值计算	66
2.4.5	小结	68
2.5	对流换热分析	68
2.5.1	影响对流换热的一般因素	68
2.5.2	对流换热过程微分方程式	69
2.5.3	对流换热微分方程组	69
2.5.4	流动边界层和热边界层	69
2.5.5	边界层换热微分方程组及其求解	70
2.5.6	边界层换热积分方程组及其求解	71
2.5.7	动量传热和热量传递的类比	72
2.5.8	外掠平板紊流换热	72
2.5.9	对流换热无量纲准则及其意义	72
2.5.10	相似理论基础	73
2.5.11	小结	74
2.6	单相流体对流换热及准则关系式	75
2.6.1	管内受迫流动对流换热	75

2.6.2	管内受迫对流换热计算	76
2.6.3	外掠圆管流动换热	77
2.6.4	自然对流换热	78
2.6.5	自然对流与受迫对流并存的混合对流换热	79
2.6.6	小结	79
2.7	凝结与沸腾换热	80
2.7.1	凝结换热	80
2.7.2	沸腾换热	80
2.7.3	小结	82
2.8	热辐射的基本定律	82
2.8.1	热辐射基本概念	82
2.8.2	普朗克定律	83
2.8.3	斯蒂芬—玻尔兹曼定律	83
2.8.4	兰贝特余弦定律	83
2.8.5	基尔霍夫定律	84
2.8.6	小结	84
2.9	辐射换热计算	85
2.9.1	角系数	85
2.9.2	黑表面间的辐射换热	85
2.9.3	灰表面间的辐射换热	86
2.9.4	气体辐射	88
2.9.5	气体与外壳间的辐射换热	89
2.9.6	太阳辐射	89
2.9.7	小结	90
2.10	传热与换热器	90
2.10.1	通过肋壁的传热	90
2.10.2	复合换热时的传热计算	91
2.10.3	传热的增强与削弱	91
2.10.4	平均温度差	92
2.10.5	换热器计算	93
2.10.6	小结	94
	复习题	95
	复习题答案与提示	105
第3章	工程流体力学及泵与风机	115
	考试大纲	115
3.1	流体动力学基础	115
3.1.1	描述流体运动的两种方法	115
3.1.2	恒定流动和非恒定流动	116

3.1.3	恒定元流能量方程	116
3.1.4	恒定总流能量方程	118
3.2	相似性原理和因次分析	120
3.2.1	力学相似	120
3.2.2	相似准数	121
3.2.3	因次分析法	122
3.2.4	模型实验	124
3.3	流动阻力和能量损失	125
3.3.1	流动阻力和能量损失的分类	125
3.3.2	层流和紊流现象	126
3.3.3	均匀流方程	127
3.3.4	圆管中的层流	127
3.3.5	紊流运动	128
3.3.6	沿程阻力的计算	129
3.3.7	非圆管的沿程损失	130
3.3.8	局部水头损失	131
3.3.9	减少阻力的措施	132
3.4	管路计算	132
3.4.1	简单管路的计算	132
3.4.2	串联管路的计算	134
3.4.3	并联管路的计算	135
3.5	特定流动分析	136
3.5.1	势函数和流函数概念	136
3.5.2	几种简单的平面无旋流动	137
3.5.3	圆柱形测速管原理	137
3.5.4	紊流射流的一般特性	139
3.5.5	特殊射流	141
3.6	气体动力学基础	142
3.6.1	理想气体一元恒定流动的运动方程	142
3.6.2	声速、滞止参数、马赫数	143
3.6.3	气体速度与断面的关系	144
3.7	泵与风机	145
3.7.1	泵与风机的性能曲线	145
3.7.2	管路性能曲线及工作点	146
3.7.3	泵或风机的联合运行	147
3.7.4	离心式泵或风机的工况调节	147
3.7.5	泵的气蚀与安装高度	149
3.7.6	泵或风机的选择	150
	复习题	150

复习题答案与提示·····	162
第4章 自动控制 ·····	171
考试大纲·····	171
4.1 自动控制与自动控制系统的一般概念·····	171
4.1.1 控制工程的基本含义·····	171
4.1.2 信息的传递·····	171
4.1.3 反馈及反馈控制·····	172
4.1.4 开环及闭环控制系统的构成·····	173
4.1.5 控制系统的分类及基本要求·····	176
4.2 控制系统的数学模型·····	178
4.2.1 控制系统各环节的特性·····	178
4.2.2 控制系统微分方程的拟定与求解·····	183
4.2.3 拉普拉斯变换与反变换·····	184
4.2.4 传递函数及其方块图·····	188
4.3 线性系统的分析与设计·····	195
4.3.1 基本调节规律及实现方法·····	195
4.3.2 控制系统的一阶瞬态响应·····	200
4.3.3 二阶瞬态响应·····	201
4.3.4 频率特性基本概念·····	204
4.3.5 频率特性表示方法·····	206
4.3.6 调节器的特性对调节质量的影响·····	218
4.3.7 二阶系统的设计方法·····	220
4.4 控制系统的稳定性与对象的调节性能·····	223
4.4.1 稳定性基本概念·····	223
4.4.2 稳定性与特征方程根的关系·····	224
4.4.3 代数稳定判据·····	224
4.4.4 对象的调节性能指标·····	226
4.5 控制系统的误差分析·····	226
4.5.1 误差及稳态误差·····	226
4.5.2 系统类型及误差度·····	227
4.5.3 静态(稳态)误差系数·····	227
4.6 控制系统的综合和校正·····	230
4.6.1 校正的概念·····	230
4.6.2 串联校正装置的形式及其特性·····	231
4.6.3 继电器调节系统(非线性系统)及校正·····	235
复习题·····	243
复习题答案与提示·····	255

第5章 热工测试技术	266
考试大纲	266
5.1 测量技术的基本知识	266
5.1.1 测量	266
5.1.2 测量精度与测量误差	267
5.1.3 常见测量方法	269
5.1.4 仪表的测量范围与测量精度	270
5.1.5 仪表的稳定性	270
5.1.6 静态特性和动态特性	271
5.1.7 传感器	272
5.1.8 传输通道	272
5.1.9 变换器	272
5.2 温度的测量	272
5.2.1 温度与温标	272
5.2.2 热电材料	274
5.2.3 热电效应测温原理	275
5.2.4 膨胀效应测温原理及其应用	276
5.2.5 热电回路性质及理论	276
5.2.6 热电偶结构及使用方法	277
5.2.7 热电阻测温原理及常用材料、常用组件的使用方法	277
5.2.8 辐射温度计	278
5.2.9 温度变送器	280
5.2.10 测温布置技术	281
5.3 湿度的测量	281
5.3.1 干湿球温度计测量原理	281
5.3.2 干湿球温度电学测量和信号传送传感	282
5.3.3 露点仪	282
5.3.4 露点仪测温布置技术	284
5.4 压力的测量	284
5.4.1 压力计	284
5.4.2 压力传感器	285
5.4.3 压力仪表的选用和安装	286
5.5 流速的测量	287
5.5.1 流速测量原理	287
5.5.2 机械风速仪的测量及结构	287
5.5.3 热线风速仪的测量原理及结构	288
5.5.4 L形动压管(毕托管)	288
5.5.5 测速仪	289

5.5.6	流速测量布置技术	289
5.6	流量的测量	290
5.6.1	节流法和容积法测流量	290
5.6.2	流量计	290
5.6.3	流量测量的布置技术	294
5.7	液位的测量	295
5.7.1	常见测液位方法	295
5.7.2	液位测量的布置及误差消除方法	295
5.8	热流量的测量	295
5.8.1	热流计的分类	295
5.8.2	热流计的布置及使用	295
5.9	误差与数据处理	296
5.9.1	误差函数的分布规律	296
5.9.2	直接测量的平均值、方差、标准误差、有效数字和测量结果表达	297
5.9.3	测量结果表达	298
5.9.4	间接测量最优值、标准误差、误差传播理论、微小误差原则、误差分配	299
5.9.5	组合测量原理	301
5.9.6	最小二乘法原理	301
5.9.7	经验公式法	301
5.9.8	相关系数	301
5.9.9	回归分析	302
5.9.10	显著性检验及分析	302
5.9.11	过失误差处理	302
5.9.12	系统误差处理方法及消除方法	302
5.9.13	误差的合成定律	302
	复习题	304
	复习题答案与提示	310
第6章	机械基础	314
	考试大纲	314
6.1	概述	314
6.1.1	机械设计的一般原则和程序	314
6.1.2	机械零件的设计准则	317
6.1.3	许用应力和安全系数	318
6.2	平面机构的自由度	320
6.2.1	运动副及其分类	321
6.2.2	平面机构运动简图	321
6.2.3	具有确定运动的条件及平面机构自由度	323
6.3	平面连杆机构	325

6.3.1	铰链四杆机构的基本形式和特性	325
6.3.2	曲柄存在的条件	325
6.3.3	铰链四杆机构的演化	326
6.4	凸轮机构	328
6.4.1	凸轮机构的应用和类型	329
6.4.2	从动件的基本运动规律	330
6.4.3	直动从动件盘形凸轮机构的轮廓曲线的绘制	331
6.5	螺纹连接	334
6.5.1	螺纹的常用类型和主要参数	334
6.5.2	螺旋副的受力分析、效率和自锁	335
6.5.3	螺纹连接的基本类型	336
6.5.4	螺纹连接的强度计算	337
6.5.5	螺纹连接设计时应注意的问题	338
6.6	带传动	339
6.6.1	带传动的工作情况分析	339
6.6.2	普通 V 带传动的主要参数和选择计算	341
6.6.3	带轮的材料和结构	346
6.6.4	带传动的张紧与维护	347
6.7	齿轮机构	347
6.7.1	齿轮机构的特点与类型	348
6.7.2	直齿圆柱齿轮各部分名称和尺寸	348
6.7.3	渐开线直齿圆柱齿轮的正确啮合条件和连续传动条件	349
6.7.4	齿轮的失效	350
6.7.5	直齿圆柱齿轮的强度计算	351
6.7.6	斜齿圆柱齿轮传动及其受力分析	355
6.7.7	齿轮的结构	356
6.7.8	蜗杆传动	357
6.8	轮系	358
6.8.1	定轴轮系及其传动比	358
6.8.2	周转轮系及其传动比	359
6.9	轴	360
6.9.1	轴的分类	361
6.9.2	轴的材料	362
6.9.3	轴的结构	362
6.9.4	轴的计算	363
6.9.5	轴毂连接类型	364
6.10	滚动轴承	367
6.10.1	滚动轴承的分类	367
6.10.2	滚动轴承的代号	369

6.10.3 滚动轴承的选择计算	371
复习题	373
复习题答案与提示	381
模拟试题 (一)	386
模拟试题 (一) 答案	391
模拟试题 (二)	395
模拟试题 (二) 答案	402
参考文献	407

第 1 章 工程热力学

考试大纲

- 1.1 基本概念：热力学系统 状态平衡 状态参数 状态公理 状态方程式 热力参数及坐标图 功和热量 热力过程 热力循环 单位制
- 1.2 准静态过程、可逆过程和不可逆过程
- 1.3 热力学第一定律：热力学第一定律的实质 内能 焓 热力学第一定律在开口系统和闭口系统的表达式 储存能 稳定流动能量方程及其应用
- 1.4 气体性质：理想气体模型及其状态方程 实际气体模型及其状态方程 压缩因子 临界参数 对比态及其定律 理想气体比热 混合气体的性质
- 1.5 理想气体基本热力过程及气体压缩：定压 定容 定温和绝热过程 多变过程 气体压缩轴功 余隙 多级压缩和中间冷却
- 1.6 热力学第二定律：热力学第二定律的实质及表述 卡诺循环和卡诺定理 熵 孤立系统 熵增原理
- 1.7 水蒸气和湿空气：蒸发 冷凝 沸腾 汽化 定压发生过程 水蒸气图表 水蒸气基本热力过程 湿空气性质 湿空气焓湿图 湿空气基本热力过程
- 1.8 气体和蒸汽的流动：喷管和扩压管 流动的基本特性和基本方程 流速 音速 流量 临界状态 绝热节流
- 1.9 动力循环：朗肯循环 回热和再热循环 热电循环 内燃机循环
- 1.10 制冷循环：空气压缩制冷循环 蒸汽压缩制冷循环 吸收式制冷循环 热泵 气体的液化

1.1 基本概念

正确理解能量传递与转换涉及的一些术语、概念和分析方法，并要结合实际研究对象去分析，注重热力状态参数的特征。

1.1.1 热力学系统

(1) 定义：根据研究问题的需要，人为地选取一定范围内的物质作为研究对象，称其为热力学系统，简称为系统。热力学系统以外的物质称为外界。热力学系统与外界的交界面称为边界。边界面的选取可以是假想的、实际的、固定的、运动的、变形的。

(2) 分类：按系统与外界的质量和能量交换情况的不同，热力学系统可分为：

1) 闭口系：热力学系统与外界无质量交换的系统。由于系统所包含的物质质量保持不变，也称之为控制质量系统。对于闭口系，常用控制质量法来研究。

2) 开口系：热力学系统与外界有物质交换的系统。开口系通常总是取一相对固定的空间，又称为控制容积系统，对其常用控制容积法来研究。

3) 绝热系：热力学系统与外界无热量交换的系统。

4) 孤立系：热力学系统与外界无任何能量和物质交换的系统。

1.1.2 状态

热力学系统在某一瞬间所呈现的宏观物理状况称为系统的状态。热力状态反映着工质大量分子热运动的平均特点，系统与外界之间能够进行能量交换的根本原因在于两者之间的热力状态存在差异。从热力学的观点出发，状态可分为平衡和非平衡两种。

1.1.3 平衡（平衡状态）

(1) 定义：平衡态是指在没有外界影响（重力场除外）的条件下，系统的宏观性质不随时间变化的状态。

(2) 实现平衡的充要条件：系统内部及系统与外界之间不存在各种不平衡势差（力差、温差、化学势差）。

在平衡状态时，参数不随时间改变，只是现象，不能作为判断系统是否平衡的条件，只有系统内部及系统与外界之间的一切不平衡势差的消失，才是实现平衡的本质，也是实现平衡的充要条件。例如，在稳态导热中，系统的状态参数不随时间改变，但此时在外界的作用下，系统有内、外势差存在，该系统的状态只能称为稳态，而不是平衡态。可见，平衡必稳定，反之，稳定未必平衡。

平衡状态具有确定的状态参数，这是平衡状态的特点。

1.1.4 状态参数

用以描述热力系统状态的某些宏观物理量称为热力状态参数，简称状态参数。

状态参数的数学特性：

$$(1) \quad \int_1^2 dx = x_2 - x_1 \quad (1-1)$$

表明：状态的路径积分仅与初、终态有关，与状态变化的途径无关。

$$(2) \quad \oint dx = 0 \quad (1-2)$$

表明：状态函数的循环积分为零。

1.1.5 状态公理

状态公理提供了确定热力系统平衡状态所需的独立参数数目的经验规则，即对于组成一定的物质系统，若存在着几种可逆功（系统进行可逆过程时和外界交换的功量）的作用，则决定该系统平衡状态的独立状态参数有 $n+1$ 个，其中“1”是系统与外界的热交换作用。

根据状态公理，简单可压缩系统平衡状态的独立参数只有两个。原则上，可以选取可测量参数 p , v 和 T 中的任意两个独立参数作为自变量，其余参数（ u , h , s 等）则为 p , v 和 T 的因变量。

1.1.6 状态方程式

对于平衡状态下基本状态参数之间，可以写成 $v = v(p, T)$ 或 $f(p, v, T) = 0$ 之间的关系，称为状态方程式。状态方程式的具体形式取决于工质的性质。

1.1.7 热力参数及坐标图

在热力学中，常用的状态参数有 6 个，即压力（ p ）、温度（ T ）、比体积（ v ）、内能（ U ）、焓（ H ）和熵（ S ）。其中与热力系的质量无关，且不可相加的状态参数，称为强度状态参数，简称强度参数，如 p 、 T 等；与热力系的质量成正比而改变，且可相加的状态参数，称为广延状态参数，简称广延参数，如 U 、 H 、 S 。单位质量的广延参数具有强度参数的性

质，称为比参数。

在常用的 6 个状态参数中，压力、比体积和温度可以直接用仪表测定，称为基本状态参数。其他的状态参数可依据这些基本状态参数之间的关系间接导出。基本状态参数有：

(1) 比体积 v ：比体积是单位质量的工质所占有的体积，单位为“ m^3/kg ”。

(2) 压力 p ：压力是指单位面积上承受的垂直作用力。对于气体，实质上是气体分子运动撞击容器壁面，在单位面积的容器壁面上所呈现的平均作用力。压力的单位是帕（Pa），有时也用千帕（kPa）和兆帕（MPa）。工质的真实压力 p 称为绝对压力。流体的压力常用压力表或真空表来测量。压力表测量的压力为表压 p_g ，真空表测量的压力为真空度 H ，表压和真空度又称为相对压力，相对压力是绝对压力与外界大气压力 B 的差值。

$$\text{当 } p > B \text{ 时} \quad p = B + p_g \quad (1-3)$$

$$\text{当 } p < B \text{ 时} \quad p = B - H \quad (1-4)$$

(3) 温度 T ：温度是确定一个系统是否与其他系统处于热平衡的状态函数。温度是热平衡的唯一判据。温度的数量表示法称为温标。温标的建立一般需要选定测温物质及其某一物理性质，规定基准点及分度方法。

热力学温标，是建立在热力学第二定律基础上的而完全不依赖测温物质性质的温标。它采用开尔文（K）作为度量温度的单位，规定水的气、液、固三相平衡共存的状态点（三相点）为基准点，并规定此点的温度为 273.16K。与热力学温度并用的有摄氏温度，其单位为摄氏度（ $^{\circ}\text{C}$ ）， $t = T - 273.15\text{K}$ 。显然，摄氏温度的零点相当于热力学温度的 273.15K，而且这两种温标的温度间隔完全相同。

对于只有两个独立参数的热力系，可以任选两个参数组成二维平面坐标图来描述被确定的平衡状态，这种坐标图称为状态参数坐标图。显然，不平衡状态由于没有一确定的参数，所以在坐标图上无法表示。经常应用的状态参数坐标图有压容图（ $p-v$ 图）和温熵图（ $T-S$ 图）等。利用坐标图进行热力分析，既直观清晰，又简单明了。

1.1.8 功和热量

热力过程中，系统与外界在不平衡势差的作用下会发生能量转换。能量转换的方式有两种——做功和传热。

功是系统与外界之间在力差的推动下，通过宏观的有序运动（有规则运动）的方式传递的能量。换言之，借做功来传递能量总是和物体的宏观位移有关。

热量是系统与外界之间在温差的推动下，通过微观粒子的无序运动（无规则运动）的方式传递的能量，也就是说，借传热来传递能量，不需要有物体的宏观移动。

功和热量不是状态参数。只有当系统状态发生变化时，才可能有功和热量的传递。所以功和热量的大小不仅与过程的初、终状态有关，而且与过程的性质有关，它们是过程量。

可逆过程的功量和热量分别用 $p-v$ 图和 $T-S$ 图上的相应面积表示。

热力学中规定，系统对外做功时功取为正，外界对系统做功时功取为负；系统吸热时热量取为正，放热时取为负。

1.1.9 热力过程

热力过程是指热力是从一个状态向另一个状态变化时所经历的全部状态的总和。

1.1.10 热力循环

工质由某一初态出发，经历一系列热力状态变化后，又回到原来初态的封闭热力过程称