

清华大学能源动力系列教材

工程热力学精要与题解

Engineering Thermodynamics Summaries,
Problems and Solutions

吴晓敏 编著

清华大学出版社

清华大学能源动力系列教材

工程热力学精要与题解

Engineering Thermodynamics Summaries,
Problems and Solutions

吴晓敏 编著

清华大学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是清华大学国家级精品课“工程热力学”的教学材料之一,可作为主教材《工程热力学(第2版)》的教学参考用书,也可单独使用。为了便于与主教材对照参考,本书各章的排序与主教材基本相同。每章内容包括主要要求、内容精要、思考题和习题的详细解答以及解题中易出现的问题和相关提示等。内容安排循序渐进,注重引导读者清晰理解和掌握基本概念、基本定律及基本定理,明确重点和难点,培养从热力学的角度抽象和解决实际问题的思维和能力。

本书适宜读者对象:能源、动力、工程热物理、制冷与低温、化工及核工程等专业学生、教师及工程技术人员等。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

工程热力学精要与题解/吴晓敏编著. --北京:清华大学出版社,2012.9

(清华大学能源动力系列教材)

ISBN 978-7-302-29086-5

I. ①工… II. ①吴… III. ①工程热力学—高等学校—教学参考资料 IV. ①TK123

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 130370 号

责任编辑:杨 倩

封面设计:常雪影

责任校对:王淑云

责任印制:杨 艳

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:北京富博印刷有限公司

装 订 者:北京市密云县京文制本装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×230mm 印 张:13.5 字 数:293 千字

版 次:2012 年 9 月第 1 版 印 次:2012 年 9 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:26.00 元

产品编号:044299-01

前言

能源危机和环境污染是制约世界经济和人类社会发展的重大问题。在我国,此问题则更加突出:我国人均占有能源量仅为世界平均水平的 $1/2$,且能源利用率低下。为此,节能是我们的基本国策。而工程热力学是研究热能与其他形式能量转换规律的一门学科,是节能的理论基础,是能源、动力、制冷与低温、化工及核工程等专业的重要的专业技术基础课。

笔者多年从事工程热力学的一线教学工作,教学实践中发现,一些同学感觉工程热力学的基本概念、基本定律和基本定理似乎并不难,但在解答具体问题时常常不知如何着手,还有一些同学在解答问题中逻辑不清、推导不够规范等,为此在教学中时常为同学们提供习题解答参考,同学们反映习题解答参考对他们的学习帮助很大。为了给更多的同学及相关人员在工程热力学的学习中提供更多的帮助与参考,特对习题解答参考进行了全面整理与完善,另外针对同学们反映的工程热力学内容略显庞杂难以抓住重点等问题,提炼了内容精要,明确了基本要求,从而形成本书。

为了便于与主教材对照参考,本书各章的排序与主教材基本相同。各章内容包括主要要求、内容精要、思考题和习题的详细解答以及同学们做题中易出现的问题和相关提示等。内容安排循序渐进,注重引导读者清晰理解和掌握基本概念、基本定律及基本定理,明确重点和难点,培养从热力学的角度抽象和解决实际问题的思维和能力。

本书适宜读者对象:能源、动力、工程热物理、制冷与低温、化工及核工程等专业学生、教师及工程技术人员等。

本书编写过程中吸取了清华大学工程热物理研究所及兄弟院校同仁们丰富的教学经验及成果,并参考了一些国外教材的内容,在此一并致谢。由衷地感谢给予笔者关心、支持和帮助的各位前辈、各位同仁、助教以及清华大学出版社的相关工作人员。

书中若有错误或不妥之处,请读者不吝指正。

作者

2012年于清华大学



主要符号表

拉丁字母

A	截面积
a	声速
A_n, a_n	总焓; 比焓
C, c	热容, 临界点; 比热容, 速度
c_p, c_v	比定压热容; 比定容热容
C'	容积热容
C_m	摩尔热容
d	比湿度, 汽耗率
E, e	总能; 比能
E_k, E_p	动能; 位能
E_x, E_{xm}, e_x	总焓; 摩尔焓; 比焓
F, f	亥姆霍兹函数; 比亥姆霍兹函数
G, G_m, g	吉布斯函数; 摩尔吉布斯函数, 比吉布斯函数
$\bar{g}_f^\circ$	标准生成吉布斯函数
H, H_m, h	总焓; 摩尔焓; 比焓
$\bar{h}_f^\circ$	标准生成焓
$[-\Delta H_f^l], [-\Delta H_f^h]$	低发热量; 高发热量
i	分子运动自由度
K_p, K_x	平衡常数
k	比热比, 绝热指数
M	摩尔质量
Ma	马赫数
$m, \dot{m}$	质量; 质量流率
n	摩尔数, 准静态功的数目, 多变指数
P	功率
p	压力
p_b, p_g, p_v	大气压力; 表压力; 真空度
Q, q	传热量, 反应热; 单位质量的传热量

Q_p	定压过程传热量, 定压热效应
Q_V	定容过程传热量, 定容热效应
r	汽化潜热
R, R_m	气体常数; 摩尔气体常数
S, S_m, s	总熵; 摩尔熵; 比熵
$S_m^*, S_m^*(T)$	标准状态的绝对熵; TK, 101.325 kPa 下的绝对熵
T, t	热力学温度; 摄氏温度
U, U_m, u	总热力学能(亦称总内能); 摩尔热力学能(亦称摩尔内能); 比热力学能(亦称比内能)
V, V_m, v	容积; 摩尔容积; 比容
W, w	容积变化功, 闭口系统净功; 比容积变化功, 闭口系统比净功
$W_{\text{net}}, w_{\text{net}}$	开口系统净功; 开口系统比净功
W_s, w_s	轴功; 比轴功
W_t, w_t	技术功; 比技术功
x	干度
x_i	摩尔成分
Z	压缩因子
z	高度

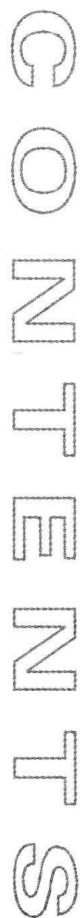
希腊字母

α	抽汽量, 离解度
α_v, α_p	弹性系数; 定压热膨胀系数
β_T, β_s	定温压缩系数; 绝热压缩系数
γ_i	容积成分
ε	制冷系数, 内燃机压缩比, 反应度
ε'	供热系数
η, η_t	效率, 热效率
η_{oi}	相对内效率
η_V	压气机容积效率
λ	内燃机定容增压比
μ	化学势
μ_J	焦-汤系数
ν_{cr}	临界压力比
π	单位质量工质做功能力损失或焓损失, 燃气轮机循环增压比

ρ	密度, 内燃机定压预胀比
σ	回热度, 表面张力
τ	时间, 燃气轮机循环增温比
φ	相对湿度, 速度系数
ω_i	质量成分
ζ	能量损失系数
下 标	
a	干空气
c	卡诺循环, 临界状态, 冷凝器; 压气机
c, v	开口系统或控制容积
d	露点
ex	焓(亦称有效能)
f	燃料, (熵)流
g	(熵)产, 气体
i	第 i 种组元
in	进口条件
iso	孤立系统
IR	不可逆机
l	液体
m	混合加热内燃机循环
max	最大
min	最小
mix	混合
n	多变过程
opt	最佳
out	出口条件
p	定压, 定压加热内燃机循环
P	生成物, 水泵
Q, q	热量
Q_o	冷量
R	可逆循环, 朗肯循环, 反应物
RG, RH	回热循环; 再热循环
r	热源, 对比状态

rev	可逆
s	饱和状态, 定熵
T	定温
T	燃气轮机、汽轮机
tu	管道
U, u	内能
V, v	定容; 水蒸气, 定容加热内燃机循环
w	湿球
0	死态, 环境
1, 2	状态 1 与 2, 瞬时 1 与 2
	上 标
', "	饱和液; 饱和气
*	滞止状态
—	平均
•	单位时间的物理量
°	环境参数, 标准态

目录



第 1 章 基本概念	1
1-1 处理工程热力学问题的一般方法	1
1-2 本章主要要求	2
1-3 本章内容精要	2
1-3-1 热力系统	2
1-3-2 状态和状态参数	2
1-3-3 基本状态参数	3
1-3-4 平衡状态及状态参数坐标图	4
1-3-5 准静态过程与可逆过程	4
1-3-6 功	5
1-3-7 热量与熵	5
1-3-8 热力循环	6
1-4 思考题及解答	6
1-5 习题详解及简要提示	7
第 2 章 热力学第一定律	14
2-1 本章主要要求	14
2-2 本章内容精要	14
2-2-1 主要概念	14
2-2-2 热力学第一定律及各种系统的能量方程	15
2-2-3 常用热力设备的能量方程	17
2-3 思考题及解答	17
2-4 习题详解及简要提示	20
第 3 章 理想气体的性质与过程	29
3-1 本章主要要求	29
3-2 本章内容精要	29
3-2-1 比定容热容和比定压热容	29
3-2-2 理想气体概念及状态方程	30
3-2-3 理想气体比热容、内能、焓及熵的计算	30

3-2-4	理想气体绝热过程的分析·····	32
3-2-5	理想气体典型热力过程的综合分析·····	33
3-2-6	活塞式压气机压气过程的分析·····	36
3-3	思考题及解答·····	37
3-4	习题详解及简要提示·····	43
第4章	热力学第二定律与熵 ·····	56
4-1	本章主要要求·····	56
4-2	本章内容精要·····	56
4-2-1	热力学第二定律的经典表述·····	56
4-2-2	卡诺定理与卡诺循环·····	56
4-2-3	克劳修斯不等式与熵的导出·····	58
4-2-4	熵变与传热量的关系及熵变计算·····	59
4-2-5	孤立系熵增原理及做功能力损失·····	61
4-2-6	物理熵·····	64
4-3	思考题及解答·····	65
4-4	习题详解及简要提示·····	68
第5章	气体动力循环 ·····	82
5-1	本章主要要求·····	82
5-2	本章内容精要·····	82
5-2-1	活塞式内燃机的三种理想循环及其对比·····	82
5-2-2	勃雷登循环与燃气动力的实际循环·····	85
5-2-3	提高勃雷登循环热效率的主要途径·····	88
5-3	思考题及解答·····	89
5-4	习题详解及简要提示·····	90
第6章	水蒸气的性质与过程 ·····	103
6-1	本章主要要求·····	103
6-2	本章内容精要·····	103
6-2-1	工质物态变化的相关术语·····	103
6-2-2	水及水蒸气状态参数的确定·····	104
6-2-3	水蒸气的定压及绝热过程分析·····	104
6-3	思考题及解答·····	106
6-4	习题详解及简要提示·····	107

第 7 章 蒸汽动力循环	113
7-1 本章主要要求	113
7-2 本章内容精要	113
7-2-1 朗肯循环及其分析	113
7-2-2 实际蒸汽动力循环的热效率及焓分析	114
7-2-3 改进循环等提高热效率的措施	115
7-3 思考题及解答	118
7-4 习题详解及简要提示	119
第 8 章 制冷及热泵循环	127
8-1 本章主要要求	127
8-2 本章内容精要	127
8-2-1 空气压缩制冷循环	127
8-2-2 蒸气压缩制冷循环	128
8-2-3 热泵循环	129
8-3 思考题及解答	130
8-4 习题详解及简要提示	131
第 9 章 理想混合气体和湿空气	137
9-1 本章主要要求	137
9-2 本章内容精要	137
9-2-1 混合气体的质量成分与摩尔成分	137
9-2-2 分压定律与分容积定律	138
9-2-3 混合气体的参数计算及绝热混合熵增	138
9-2-4 湿空气及其性质	140
9-2-5 比湿度的确定和湿球温度	142
9-2-6 湿空气的焓湿图及基本热力过程	142
9-3 思考题及解答	144
9-4 习题详解及简要提示	146
第 10 章 热力学微分关系式及实际气体的性质	157
10-1 本章主要要求	157
10-2 本章内容精要	157
10-2-1 吉布斯方程及麦克斯韦关系	157

10-2-2	熵、内能、焓及比热容的微分关系式·····	158
10-2-3	克拉贝龙方程和焦-汤系数·····	160
10-2-4	实际气体对理想气体性质的偏离·····	160
10-2-5	维里方程与范德瓦尔状态方程·····	161
10-2-6	对比态原理与通用压缩因子图·····	161
10-3	思考题及解答·····	163
10-4	习题详解及简要提示·····	165
第 11 章 气体在喷管中的流动 ·····		174
11-1	思考题及解答·····	174
11-2	习题详解及简要提示·····	176
第 12 章 化学热力学基础 ·····		185
12-1	本章主要要求·····	185
12-2	本章内容精要·····	185
12-2-1	热力学第一定律在化学反应中的应用·····	185
12-2-2	化学反应过程的热力学第二定律分析·····	187
12-2-3	化学平衡·····	188
12-2-4	热力学第三定律与绝对熵·····	191
12-3	思考题及解答·····	192
12-4	习题详解及简要提示·····	193

1-1 处理工程热力学问题的一般方法

工程热力学的问题主要是围绕热能与功之间转换的问题。充分理解和掌握热力学的基本概念、基本定律以及工质性质与过程特点等是求解工程热力学问题的基础。求解工程热力学问题的一般方法和步骤如下。

1. **明确题意** 仔细审题,弄清题意。有些问题(特别是热力学第二定律的问题)可画出示意框图,这样可使热力关系变得直观清晰,便于分析。例如习题 4-3 等。

2. **巧选系统** 系统的选择具有随意性,同一问题,可以选择不同的系统,如开口系统或闭口系统及孤立系统等。选定系统后沿边界找出系统与外界传递的质量、功及热量。系统选得巧,则便于分析和解决问题。

3. **明确工质、用对处理方法** 针对不同的工质,如理想气体、理想气体混合物、湿空气、过热蒸气、湿蒸气、饱和蒸气及液体,采用相应的处理方法,例如理想气体状态方程或查图表及用软件等。

另外,一般理想气体的比热容取为常数;过冷液的焓值可视为同温下饱和液的焓值。

4. **画热力过程图** 根据需要,将理想气体的热力过程画在 $p-v$ 图、 $T-s$ 图上,蒸汽动力循环画在 $p-v$ 图、 $T-s$ 图及 $h-s$ 图上,制冷或热泵循环画在 $T-s$ 图、 $\ln p-h$ 图上,湿空气过程画在 $h-d$ 图上。并注意可逆及准静态过程用实线表示。用好过程特征及过程方程。

5. **质量守恒定律** 有时需要。

6. **用对热力学第一定律表达式** 针对选定的系统,如开口系统、闭口系统及稳定流动系统等,使用相应的热力学第一定律表达式。

另外,工程热力学对某些过程的常规处理方法列举如下:

- ① 快速进行的过程,可视为绝热过程;
- ② 透热缓慢进行的过程,可认为系统的温度随时与外界相同;
- ③ 绝热刚性容器放气,容器内的理想气体满足 $pv^k = \text{常数}$ 。

7. **巧用热力学第二定律表达式** 热力学第二定律的表达式有多个,其中孤立系熵增公式应用最广;但卡诺循环及卡诺逆循环的热与功及冷热源温度的关系式用于处理可逆循环问题更简单而方便,例如习题 4-16、习题 4-18

等；而熵变与传热量关系式有时更便于处理涉及熵变与传热量的问题。

另外，系统能做最大功、达到最高压力或消耗最小功，则一定是可逆过程。

8. 最后要强调的是，解题时尽量推导到最终的最简表达式，之后再数值计算。这样不仅可以减少计算量、避免计算错误和误差，更重要的是由最简表达式可直观明确各参数间的因果关系，有助于对物理过程及概念的理解。

1-2 本章主要要求

理解和掌握热力学基本概念：热力系、平衡态、准静态过程、可逆过程、状态参数、状态量、过程量、功量、热量、熵、 $p-v$ 图和 $T-s$ 图、循环及其评价指标。

1-3 本章内容精要

1-3-1 热力系统

热力学系统(系统、热力系或体系)：人为地划定一个或多个任意几何面所围成空间的物质，作为热力学的研究对象。

外界：系统之外的一切物质的统称。

边界：系统与外界的界面。真实的或想象的，固定的或移动的界面都可作边界面。系统与外界通过边界进行能量及物质的传递。

闭口系统：与外界没有物质交换的系统，又叫做控制质量系统。

开口系统：与外界有物质交换的系统，又称为控制容积系统。

稳定流动系统：如果开口系统内工质的质量与参数均不随时间变化，则称为稳定流动系统，否则为不稳定流动开口系统。

简单压缩系统：与外界之间只交换热量及一种准静态功的系统。工程热力学中讨论的大部分系统都是简单可压缩系统。

孤立系统：与外界之间既无物质交换又无能量交换的系统。绝对的孤立系统不存在的，但是可以认为任何非孤立系统+相关的外界=孤立系统。

1-3-2 状态和状态参数

状态参数：用以描述系统内工质所处状态的一些宏观物理量。工质状态参数的变化量只取决于给定的初态与终态，而与变化过程中的状态或路径无关。

状态参数的积分特性：当系统由初态 1 变化到终态 2 时，状态参数 z 的变化量与初态和终态相关，而与路径无关，即

$$\Delta z = \int_{1,a}^2 dz = \int_{1,b}^2 dz = z_2 - z_1 \quad (1-1)$$

当系统经历一系列状态变化而又回复到初态时,其状态参数的变化为零,即它的循环积分分为零,

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

状态参数的微分特性: 状态参数的微分是全微分。设状态参数 z 是另外两个变量 x 和 y 的函数;则

$$dz = \left(\frac{\partial z}{\partial x} \right)_y dx + \left(\frac{\partial z}{\partial y} \right)_x dy \quad (1-3)$$

在数学上的充要条件为

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} = \frac{\partial^2 z}{\partial y \partial x} \quad (1-4)$$

如果某物理量具有上述数学特征,则该物理量一定是状态参数。

强度参数: 与系统内所含物质的数量无关的状态参数,例如压力、温度、密度等。

广延参数: 与系统内所含物质的数量有关的状态参数,例如容积、内能、焓等。

比参数: 单位物理量的广延参数。比参数具有强度参数的性质,例如比容、比内能、比焓等。比参数用相应的小写字母表示,而且为了书写方便,把除比容以外的其他比参数的“比”字省略。

1-3-3 基本状态参数

基本状态参数: 压力、比容和温度是三个可以测量而且又常用的状态参数。其他的状态参数可依据这些基本状态参数之间的关系(详见第10章)间接地导出。

(1) **压力(又称压强):** 流体单位面积上所作用力的法向分量。

绝对压力 p : 工质真实的压力。

表压力 p_g : 绝对压力高于环境压力($p > p_b$)时,压力计指示的数值。

真空度 p_v : 绝对压力低于环境压力($p < p_b$)时,压力计指示的读数。

三者的关系:

$$p = p_g + p_b \quad (1-5)$$

$$p = p_b - p_v \quad (1-6)$$

关于压力注意以下两点:

① 只有工质绝对压力是状态参数;

② 压力与流体高度及密度的关系, $p = \rho gh$ 。

(2) **温度:** 描述处于同一热平衡状态各系统的宏观特性的状态参数。

热力学第零定律: 与第三个系统处于热平衡的两个系统,彼此也处于热平衡。

热力学温度 T 与摄氏温度 t 的关系: $t/^\circ\text{C} = T/\text{K} - 273.15$ 。

(3) 比容 v : 单位质量工质所占的容积, 单位是 m^3/kg 。

密度: 单位容积内所包含的工质的质量。是比容的倒数。

1-3-4 平衡状态及状态参数坐标图

平衡状态: 在不受外界影响(重力场除外)的条件下, 状态参数不随时间变化的状态。平衡状态下系统的状态可用确定的状态参数来描述。

实现平衡的充要条件 $\begin{cases} \text{热平衡, 系统内无温差;} \\ \text{力学平衡, 系统内无压力差。} \end{cases}$

对于有相变及化学反应的情况, 将存在化学势差, 当这种势差消失时达到相应的相平衡或化学平衡。

状态公理:

描述热力系统状态的独立参数数目 $N =$ 不平衡势差数
 $=$ 能量转换方式的数目
 $=$ 各种功的方式 + 热量 $= n + 1$

简单可压缩系统的独立状态参数只有两个。

状态方程: 基本状态参数 p, v, T 之间的关系

$$v = f(p, T) \quad \text{或} \quad f(p, v, T) = 0$$

状态方程的具体形式取决于工质的性质。理想气体的状态方程 $p v = R T$ 最为简单。其他工质的状态方程将在第 10 章介绍。

状态参数坐标图

简单可压缩系统的独立状态参数只有两个, 可以表示在平面坐标图上。常用的坐标图有 $p-v$ 图, 如图 1-1 所示, 纵轴表示状态参数 p , 横轴表示状态参数 v 。

1-3-5 准静态过程与可逆过程

准静态过程: 使系统状态改变的不平衡势差无限小, 以致该系统在任意时刻均无限接近于某个平衡态的过程。在 $p-v$ 图上就可以在 1、2 点之间用实线表示, 如图 1-1 所示, 而非准静态过程要用虚线表示。大多数实际工程的过程都可看作准静态过程。建立准静态过程概念的意义: 既可以进行热功转换, 又可以用确定的状态参数描述过程。

耗散效应: 通过摩擦、电阻、磁阻等使功变热的效应。耗散效应并不影响准静态过程的实现。

可逆过程: 系统经历一个过程后, 如令过程逆行而能使系统与外界同时恢复到初始状态而不留下任何痕迹的过程。无耗散的准静态过程就是可逆过程。

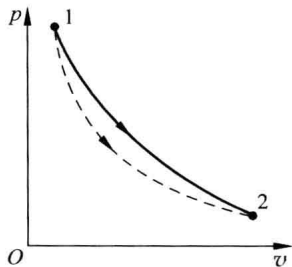


图 1-1 准静态与非准静态过程

1-3-6 功

功：系统与外界交换能量的一种方式，其唯一效果可归结为外界举起了一个重物。

准静态过程的容积变化功（准静态功）

$$W = \int_1^2 p dV \quad (1-7)$$

如图 1-2 所示，在 p - V 图中是过程曲线与横坐标围成的面积，因此 p - V 图或 p - v 图又称为**示功图**。

若过程不同，则容积变化功不相同，所以功是过程量。

气体膨胀，功量为正，气体对外做功。

气体被压缩，功量为负，外界对气体做功。

式(1-7)同样适用于可逆过程，但不能用于非准静态过程。

单位质量气体准静态或可逆过程中的比容积变化功

$$\delta w = \frac{1}{m} p dV = p dv \quad (1-8)$$

$$w = \int_1^2 p dv \quad (1-9)$$

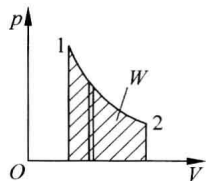


图 1-2 p - V 图(示功图)

1-3-7 热量与熵

热量：系统与外界之间依靠温差传递的能量。这是与功不同的另一种能量传递方式。规定系统吸热时热量取正值，放热时取负值。

熵的定义：

系统在微元可逆过程中与外界交换的热量 δQ_{rev} 除以传热时系统的热力学温度 T 所得的商，即为系统熵的微小增量

$$dS = \frac{\delta Q_{\text{rev}}}{T} \quad (1-10)$$

可逆过程传热量的计算式为

$$Q_{\text{rev}} = \int T dS \quad (1-11)$$

比熵(也常简称为熵)

$$ds = \frac{\delta q_{\text{rev}}}{T} \quad (1-12)$$

熵是广延参数，具有可加性，均匀系统 m kg 工质的熵为 $S = m \cdot s$

熵的单位为 J/K，比熵的单位为 J/(kg · K)。

T - S 图：由于 $\delta Q_{\text{rev}} = T dS$ ，如图 1-3 所示，1-2 可逆过程中系统与外界交换的热量 Q_{rev} 可以用过程线 12 下的面积代表。 T - S 或 T - s 图又称**示热图**。

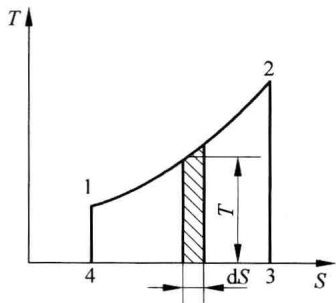


图 1-3 T - S 图(示热图)