

# 期中复习

沈扬

# Outline

- 简答或判断  
一些基本概念

- 计算或证明

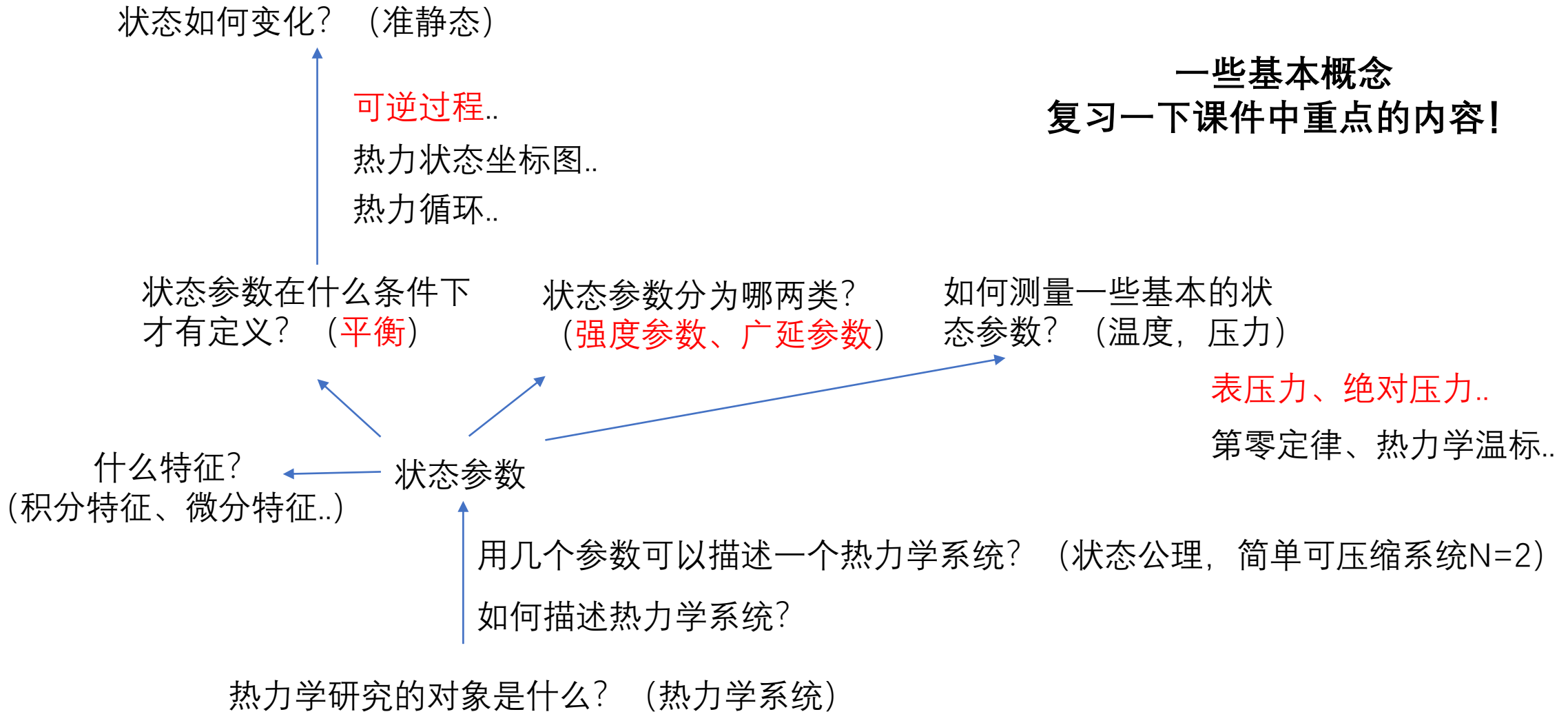
热力学第一定律

热力学第二定律

气体的热力性质

热力学一般关系式

一些基本概念  
复习一下课件中重点的内容!



工程热力学是以研究热能与机械能之间相互转换规律为主要内容的学科

在应用热力学第一定律和第二定律分析热力学系统时，  
如何计算工质的热力学性质？

第四章 热力学一般关系式  
第五章 气体的热力学性质

第六章 蒸气的热力学性质  
第七章 混合物与湿空气的热力学性质

# 孤立系统熵增原理

孤立系统 = 非孤立系统 + 相关外界

$$dS_{iso} \geq 0$$

> 不可逆过程 **irreversible process**  
= 可逆过程 **reversible process**  
< 不可能过程 **impossible process**

最常用的热二律表达式  
任何热过程能否进行的一般性判据

$\Delta u, \Delta h$   $\Delta s$

+ 环境 = 孤立系统

闭口系

$$\delta Q = dU + \delta W$$
$$Q = \Delta U + W$$

闭口系热一律表达式

开口系

稳流开口:  $q = \Delta h + w_t$

“在任何发生能量传递和转换的热力过程中，传递和转换前后能量的总量维持恒定。”

热力学第一定律

热力学第二定律

后半学期  
基于工质的热力学性质+热力学定律  
分析实际热力过程和循环的规律

热力学系统在能量传递与转换过程中满足什么规律？

# 一些基本概念

复习一下课件中重点的内容!

$$\eta_{t,c} = \frac{W}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

克劳修斯不等式反映循环的方向性

熵反映自发过程的方向性

$$\Delta S_{12} = S_2 - S_1 \geq \int_{12} \frac{\delta Q}{T}$$

> 不可逆  
= 可逆  
< 不可能

热二律表达式之一

$$\Delta S = S_f + S_g$$

孤立系统熵增原理

焓!

三个推论

+ 环境 = 孤立系统

热力学第二定律

能量传递

1850年

克劳修斯表述

热功转换

1851年

开尔文表述

卡诺定理..  
(热机最高理想热效率)

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$$

< 不可逆循环  
= 可逆循环

热力学绝对温标

闭口系

$$\delta Q = dU + \delta W$$
$$Q = \Delta U + W$$

闭口系热一律表达式

开口系

稳流开口:  $q = \Delta h + w_t$

推进功、流动功..

$$h = u + pv$$

热力学第一定律

准静功..

$\delta Q$

内能..

焓..

状态参数..

热量、功量..

(过程量和状态量)

哪两种能量形式?

“在任何发生能量传递和转换的热力过程中，传递和转换前后能量的总量维持恒定。”

实际气体状态方程、压缩因子...

热力学系统在能量传递与转换过程中满足什么规律?

# 如何分析系统的熵产？

## 几种表述形式

- 试求某过程所需要的最小功 or 所能完成的最大功（教材3-14）
- 试求某过程的熵产 or 可用能损失（教材3-12，参考书7-19）
- 判断某一过程能否发生（教材3-6）

**孤立系统熵增原理：孤立系统的熵只能增大，或者不变，绝不能减小。**

非孤立系 + 相关外界 = 孤立系

孤立系统经过一可逆过程，熵变为0

经过一不可逆过程，熵变为正

经过一不可能过程，熵变为负

**孤立系统总熵变=熵产**

# 如何计算熵产?

- 寻找一个孤立系统
- **分别计算孤立系统中每个对象熵的变化**
- 求和得到孤立系统总熵变
- 孤立系统总熵变=熵产



# 理解熵变的计算

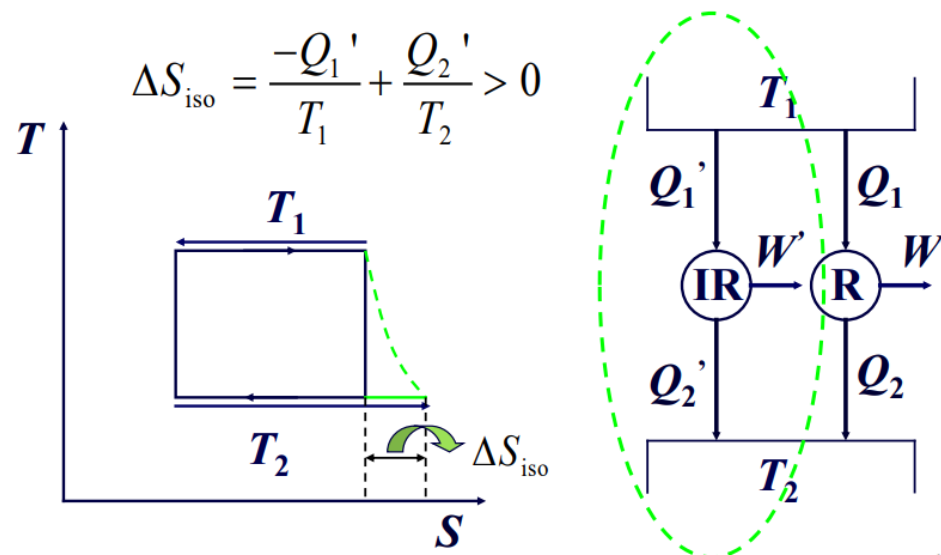
- 熵是状态量，不论是经过一可逆过程还是不可逆过程， $S_2 - S_1$ 是一样的。那不可逆体现在哪里呢？孤立系统中环境的熵增加了。
- 我们并没有直接计算熵产，而是用熵变来间接计算熵产。

$$dS \geq \frac{\delta Q}{T}; \quad S_2 - S_1 \geq \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}$$

孤立系统

$$S_g = \sum \Delta S$$

两恒温热源间工作的不可逆热机



# 如何计算熵产?

- 寻找一个孤立系统
- **分别计算孤立系统中每个对象熵的变化**
- 求和得到孤立系统总熵变
- 孤立系统总熵变=熵产

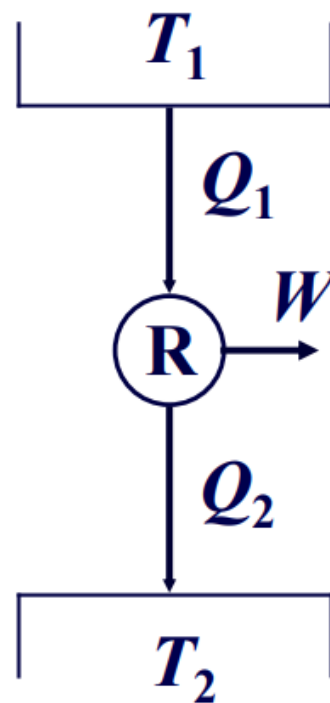
# 热源（蓄热器）

## 4. 热源（蓄热器）：

与外界交换热量  
 $T$  始终不变

热源  $T_1$  的熵变

$$\Delta S = \int \frac{\delta Q_{\text{re}}}{T} = \frac{-Q_1}{T_1}$$



# 固体和液体

3. 固体和液体:  $dS = \frac{\delta Q_{re}}{T}$  熵变与过程无关

$$\text{而 } \delta Q_{re} = dU + pdv = dU = cmdT$$

$$\therefore dS = \frac{\delta Q_{re}}{T} = \frac{cmdT}{T} \quad \text{通常 } c_p = c_v = c \quad \text{常数}$$

$$\therefore \Delta S = cm \ln \frac{T_2}{T_1} \quad \text{例: 水 } c = 4.1868 \text{ kJ/kg.K}$$

# 理想气体

## 理想气体 $\Delta s$ 的计算

$$ds = c_v \frac{dT}{T} + R \frac{dv}{v} = c_p \frac{dT}{T} - R \frac{dp}{p} = c_p \frac{dv}{v} + c_v \frac{dp}{p}$$

理想气体，任何过程

### 1. 若定比热

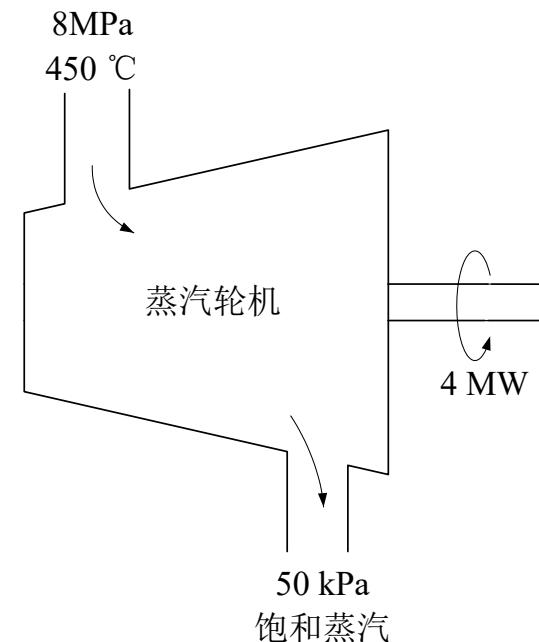
$$\begin{aligned}\Delta s &= c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1} \\ &= c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1} = c_p \ln \frac{v_2}{v_1} + c_v \ln \frac{p_2}{p_1}\end{aligned}$$

教材P130：在压力不太高、密度较小的参数范围内，一般气体工质按理想气体性质计算已能满足工程计算的精度要求，因此理想气体性质在热力过程中有着广泛的实用价值。本书中涉及的气体热力过程，在无特别注明的情况下，可按理想气体性质进行分析和计算。

# 初末态熵差

**7-19** 流量为  $25000 \text{ kg/h}$  的蒸汽在汽轮机中稳定膨胀。在入口处蒸汽  $p_1 = 8 \text{ MPa}$  ,  $t_1 = 450 \text{ }^\circ\text{C}$  , 出口处蒸汽为  $p_2 = 50 \text{ kPa}$  的饱和蒸汽, 如图 7-7 所示。如果汽轮机的功率为  $4 \text{ MW}$  , 确定此过程中的熵损率。假定环境温度为  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  。已知蒸汽在入口处参数:  $h_1 = 3272 \text{ kJ/kg}$  ,  $s_1 = 6.5551 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$  ; 出口处参数:  $h_2 = 2645.9 \text{ kJ/kg}$  ,  $s_2 = 7.5939 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$  。

熵是状态量!



# 如何计算系统中所有对象熵的变化？

建立孤立系统中不同对象间的能量关系

- 热力学第一定律

$$\delta Q = dU + \delta W$$

$$Q = \Delta U + W$$

闭口系热一律表达式

稳流开口：  $q = \Delta h + w_t$

# 如何计算做功能力损失？

- 焓：当系统由任意状态可逆地变化到与环境相平衡的状态时，系统能够对外界做出的最大有用功。

Ex损失

$$\pi = W_{\max} - W = T_0 \Delta S_g$$



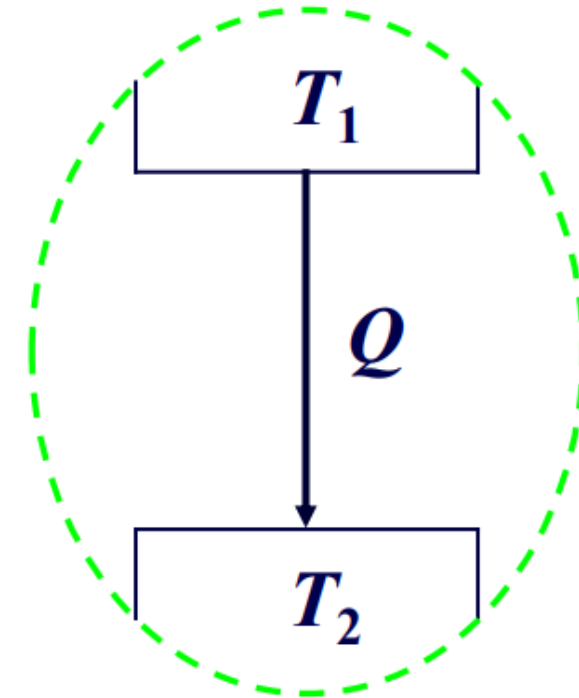
# 有限温差传热

取热源 $T_1$ 和 $T_2$ 为孤立系

$$\begin{aligned}\Delta S_{\text{iso}} &= \Delta S_{T_1} + \Delta S_{T_2} \\ &= \frac{-Q}{T_1} + \frac{Q}{T_2} = Q \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)\end{aligned}$$

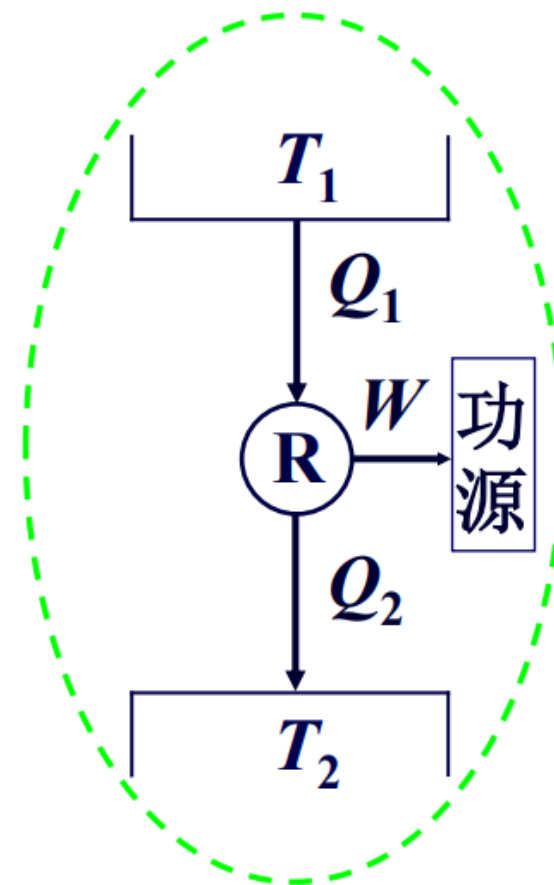
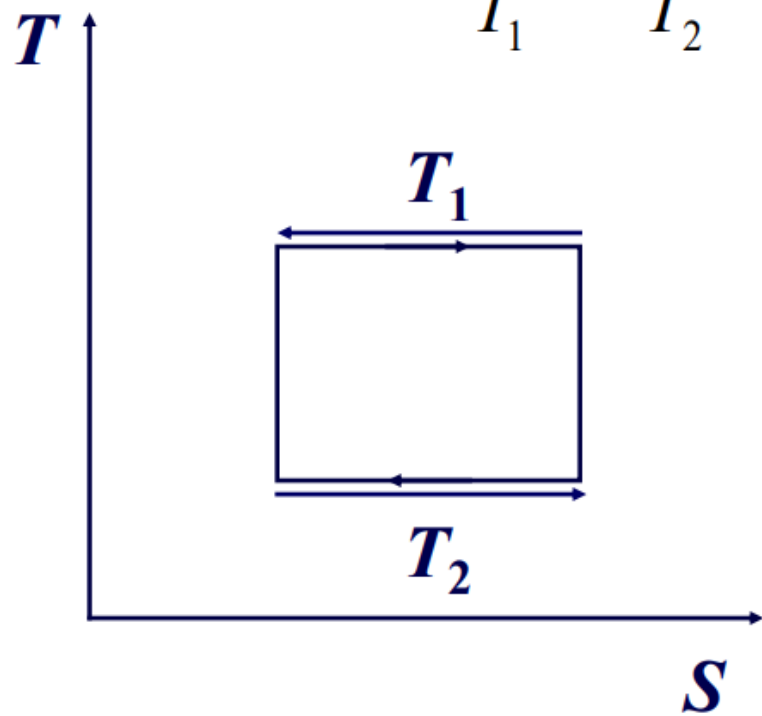
$$\because T_1 > T_2 \quad \therefore \Delta S_{\text{iso}} > 0$$

不可逆过程



# 两恒温热源间工作的可逆热机

$$\Delta S_{\text{iso}} = \frac{-Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0$$



# 两恒温热源间工作的不可逆热机

## 不可逆热机

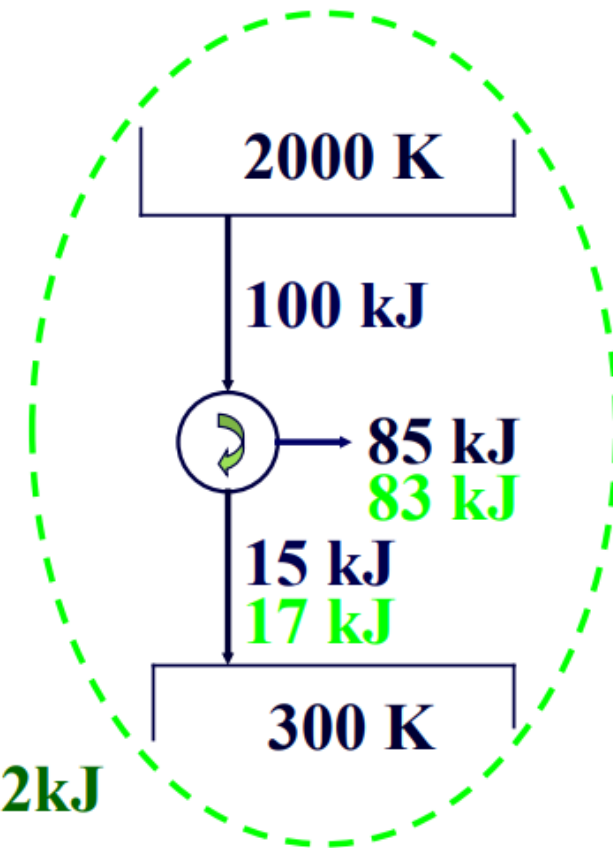
由于膨胀时摩擦

$$\begin{aligned}\Delta S_{\text{iso}} &= \Delta S_{T_1} + \Delta S_{\text{cycle}} + \Delta S_{T_2} \\ &= \frac{-100}{2000} + 0 + \frac{17}{300} \\ &= 0.0067 \text{ kJ/K} > 0\end{aligned}$$

摩擦耗功 **2kJ**

$T_0=300\text{K}$

作功能力损失  $\pi = T_0 \times \Delta S_{\text{iso}} = 2\text{kJ}$



给出热机膨胀时熵增  $\Delta S_{\text{iso}}$ ，如何计算向冷源多放出的热量？

# 参考书6-9

6-9 一刚性容器内有温度为 $40^\circ\text{C}$ 的理想气体，一轮桨不断搅拌气体，对气体做功 $200\text{kJ}$ ，如图6-3所示。由于系统与外界之间的热量传递，理想气体的温度在整个过程中保持不变，环境温度为 $30^\circ\text{C}$ 。求过程中理想气体的熵变、搅拌引起的熵产以及传热引起的熵产。

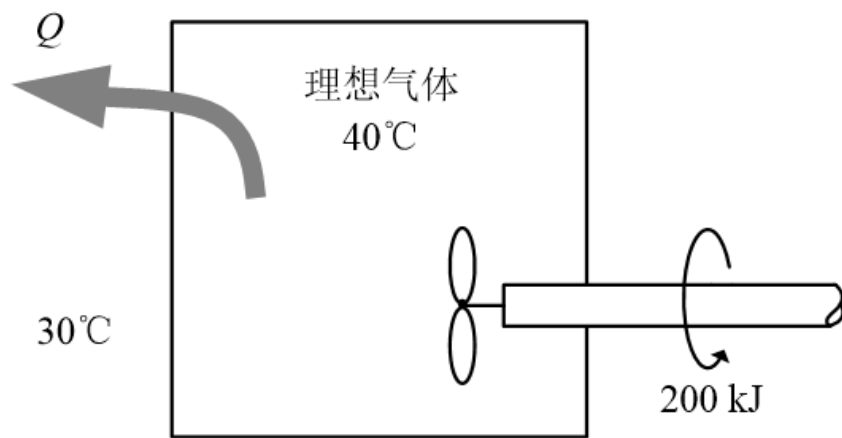


图 6-3 习题 6-9 附图

理想气体的体积和温度均不变，因此其熵变为0。

以理想气体和环境整体为研究对象，列闭口系熵平衡方程，求得搅拌和传热的总熵产为0.66 kJ/K。

以理想气体为研究对象，列闭口系熵平衡方程，求得搅拌引起的熵产为0.639 kJ/K。

$$S_g = \Delta S - S_f$$

因此，传热的熵产为0.021 kJ/K。

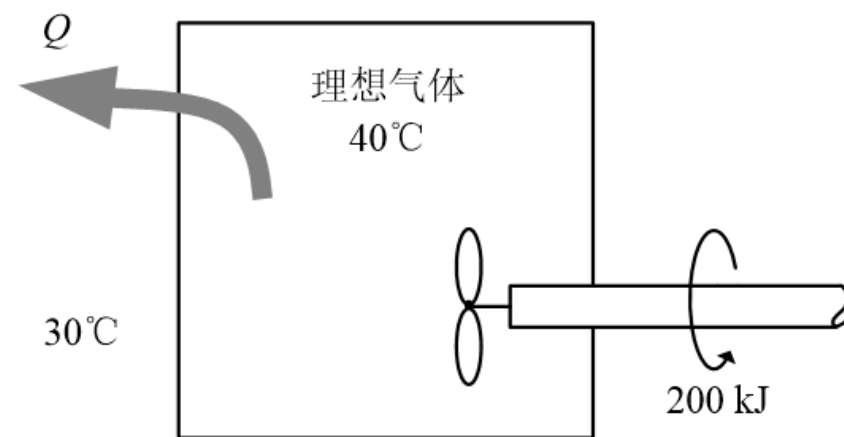


图 6-3 习题 6-9 附图

# 固体传热

教材3-14：两个质量为 $m$ ，比热容 $c$ 为定值的相同物体处于同一温度 $T_i$ 。将两物体分别作为制冷机的冷、热源，使热从一物体移出并传给另一物体，结果一个物体温度连续下降，而另一个物体连续上升。试证明：当被冷却的物体温度降到 $T_f$  ( $T_f < T_i$ ) 时所需的最小功 $W_{min} = mc \left( \frac{T_i^2}{T_f} + T_f - 2T_i \right)$ 。

可逆过程，耗功最小，由热源、冷源和可逆热机组成的孤立系熵变为0

设冷源被移出热量后，温度由 $T_i$ 降至 $T_f$ ，热源吸收热量后，温度由 $T_i$ 上升至 $T_x$ ，于是有

$$\int_{T_i}^{T_x} cm \left( \frac{dT}{T} \right) + \int_{T_i}^{T_f} cm \left( \frac{dT}{T} \right) = 0$$

我们可以得到冷源温度 $T_f$ 和热源温度 $T_x$ 间的关系为

$$T_x \cdot T_f = T_i^2$$

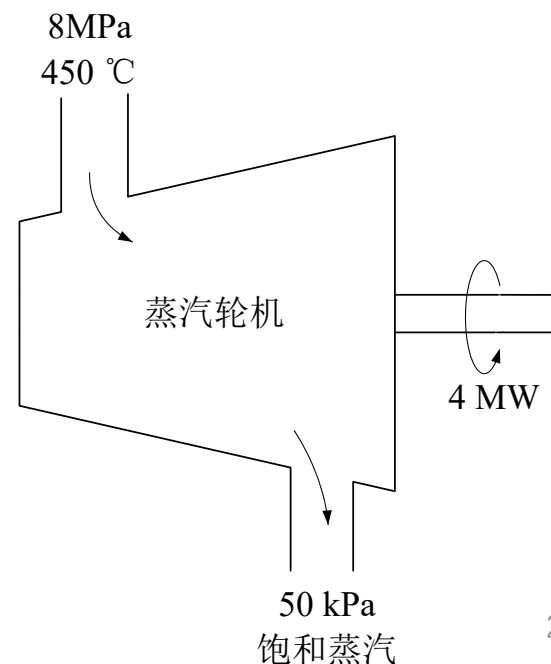
根据热力学第一定律，可以得到可逆制冷机消耗功量为

$$W_{\min} = Q_{\text{热}} - Q_{\text{冷}} = cm(T_x - T_i) - cm(T_i - T_f) = cm(T_x + T_f - 2T_i)$$

$$W_{\min} = mc \left( \frac{T_i^2}{T_f} + T_f - 2T_i \right)$$

# 稳定流动过程

**7-19** 流量为  $25000 \text{ kg/h}$  的蒸汽在汽轮机中稳定膨胀。在入口处蒸汽  $p_1 = 8 \text{ MPa}$  ,  $t_1 = 450 \text{ }^\circ\text{C}$  , 出口处蒸汽为  $p_2 = 50 \text{ kPa}$  的饱和蒸汽, 如图 7-7 所示。如果汽轮机的功率为  $4 \text{ MW}$  , 确定此过程中的熵损率。假定环境温度为  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  。已知蒸汽在入口处参数:  $h_1 = 3272 \text{ kJ/kg}$  ,  $s_1 = 6.5551 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$  ; 出口处参数:  $h_2 = 2645.9 \text{ kJ/kg}$  ,  $s_2 = 7.5939 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$  。



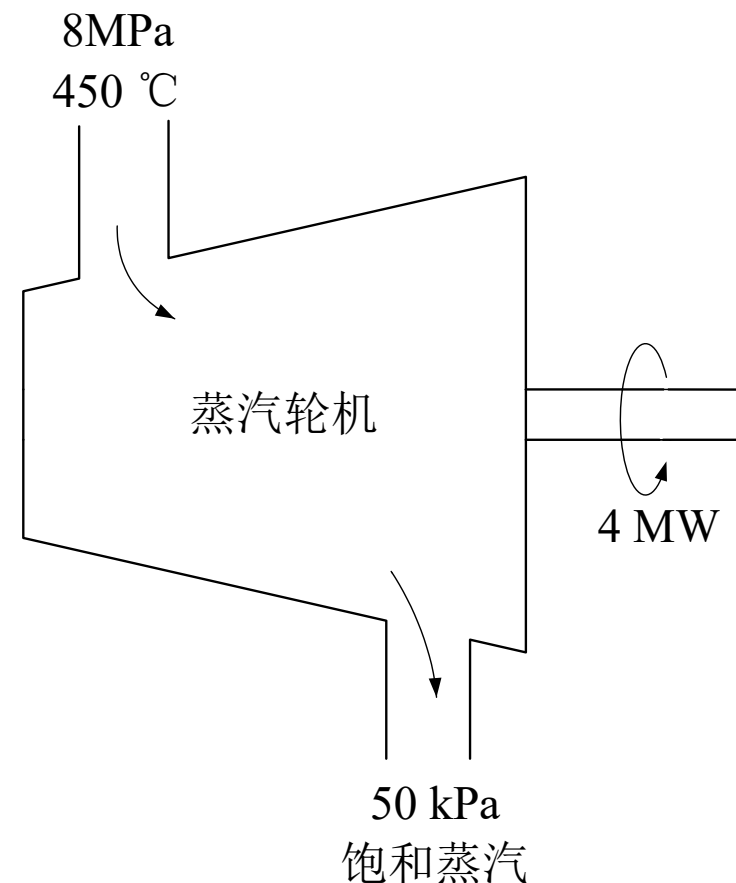


以蒸汽和环境整体作为研究对象，熵产率等于蒸汽和环境的熵变率之和，结果为

$$\dot{S}_g = \frac{\dot{Q}}{T_0} + q_m (s_2 - s_1)$$

以蒸汽轮机为研究对象，这是一个开口系。运用稳定流动能量方程求得蒸汽轮机放热 $Q$ 。

$$\dot{Q} = \Delta H + W_t$$



# 稳定流动过程+理想气体（教材5-2）

进口参数 $t_1 = 20^\circ\text{C}$ ,  $p_1 = 0.1 \text{ MPa}$  的氧气，经压缩机绝热压缩到出口参数 $t_2 = 220^\circ\text{C}$ ,  $p_2 = 0.6 \text{ MPa}$ 。计算压缩1 mol氧气所耗功量及有效能损失（取环境温度 $t = 20^\circ\text{C}$ ）。计算时（1）视摩尔热容为定值（2）用摩尔热容公式。

按开系能量平衡方程，绝热压缩耗功 $W_{1-2}$ 为

$$W_{1-2} = -\Delta H_{m,1-2} = -C_{p,m}(t_2 - t_1)$$

绝热压缩，熵产即为氧气的熵增量

$$S_g = \Delta S_{m,1-2} = C_{p,m} \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1}$$

$$W_l = T_0 S_g$$

# 闭口系（教材3-12）

气体在气缸中被压缩，其热力学能的变化为55.9 kJ/kg，熵变化为-0.293 kJ/(kg K)，输给气体的功为186 kJ/kg。温度为20°C的环境可与气体发生热交换，试确定每压缩1 kg气体的熵产。

总熵产 = 气体熵变 + 环境熵变

环境熵的变化量为

$$\Delta S_{\text{环境}} = \Delta Q / T_0$$

其中 $\Delta Q$ 可以用闭口系的热力学第一定律获得

$$\delta Q = dU + \delta W$$

$$Q = \Delta U + W$$

闭口系热一律表达式

# 课件上一些典型系数的推导

- 四个基本热力学关系式，八个偏导数，四个Maxwell式
- 体膨胀系数，等温压缩系数，绝热压缩系数，压力的温度系数
- 比热容，比热容差，绝热节流系数
- 内能，焓，熵的微分式

# 关于偏导数

- 定义偏导数的时候，一定要说明使用的整体坐标系统，即自由变量到底是谁。
- 状态公理告诉我们，对于简单可压缩系统，独立变量数 $N=2$

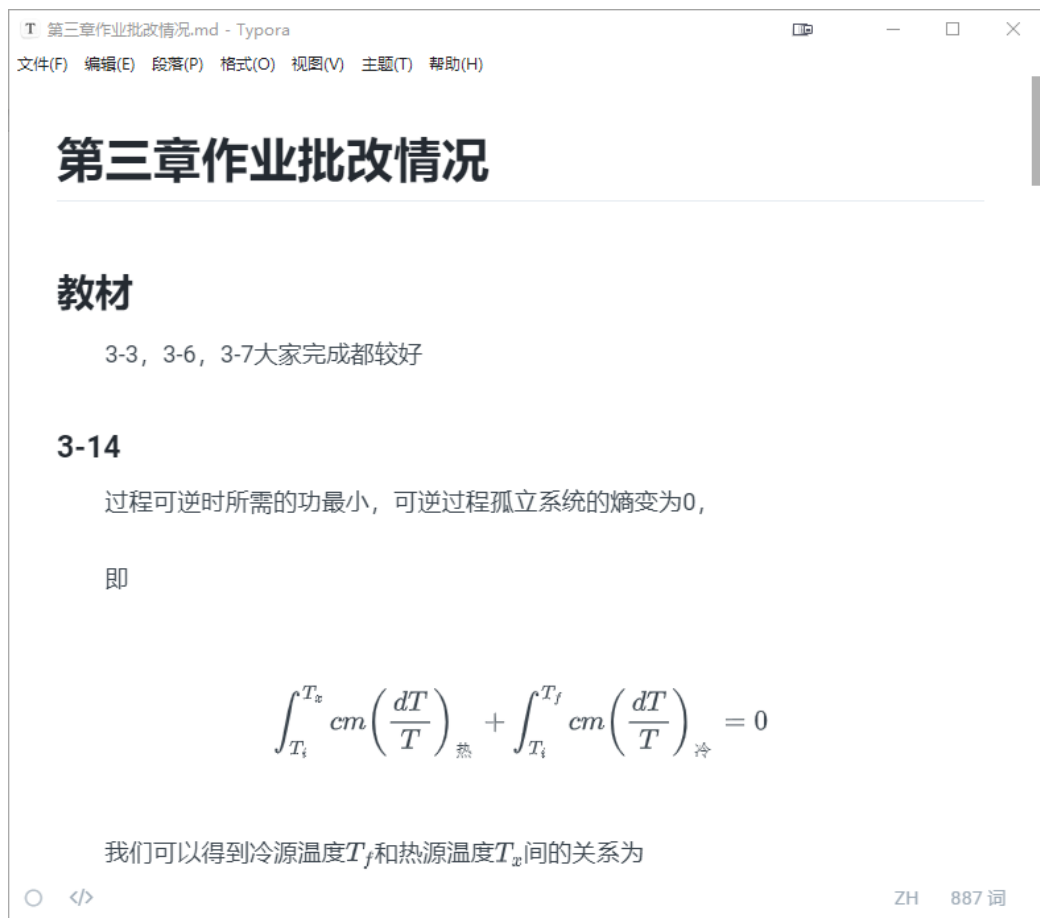
$$\begin{aligned}df(T, P) &= c_1 dT + c_2 dP + c_3 dv(T, P) \\&= c_1 dT + c_2 dP + c_3 \left( \frac{\partial v(T, P)}{\partial T} dT + \frac{\partial v(T, P)}{\partial P} dP \right) \\ \therefore \frac{\partial f(T, P)}{\partial T} &= c_1 + c_3 \frac{\partial v(T, P)}{\partial T}\end{aligned}$$

拉格朗日函数L

$$\frac{dL(t, q_1, \dots, q_\alpha, \dot{q}_1, \dots, \dot{q}_\alpha)}{dt} = \frac{\partial L}{\partial t} + \sum_{\alpha=1}^s \frac{\partial L}{\partial q_\alpha} \dot{q}_\alpha + \sum_{\alpha=1}^s \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_\alpha} \frac{d\dot{q}_\alpha}{dt}$$

一些安利!

# 用Latex或Markdown写作业或整理笔记



Typora, Obsidian



让微信排版变Nice <https://mdnice.com/>

# ThuCoursework: 清华大学课程作业模板

清华大学数学系  
偏微分方程数值解  
2022年春季学期

## 作业 1

航天航空学院, 沈扬, 2021310957

2022年5月31日

### 1.1. 考虑初值问题

$$y' = -50y + 50t^2 + 2t, y(0) = 1/3$$

其准确解为

$$y(t) = \frac{1}{3}e^{-50t} + t^2.$$

分别用欧拉法、梯形法、3步Adams-Bashforth法和4级4阶显示龙格-库塔法数值求解, 截至时间为 $t^* = 5$ . 对于时间步长 $h = 1/16, 1/32, 1/64, 1/128$ , 输出各种方法的 $l_2$ 误差. 并利用最小二乘法拟合得到误差 $e$ 和步长 $h$ 的关系.

解. 显式欧拉法具有一阶精度, 其数值公式为

$$y_{n+1} = y_n + hf(x_n, y_n). \quad (1)$$

梯形法是隐式的单步法, 具有二阶精度, 其数值公式为

Runge-Kutta:

$$\log(e) = 7.788 \log(h) + 19.04 \quad (9)$$

从拟合公式及图中误差分布可以看到, 结果与算法的阶数基本一致.

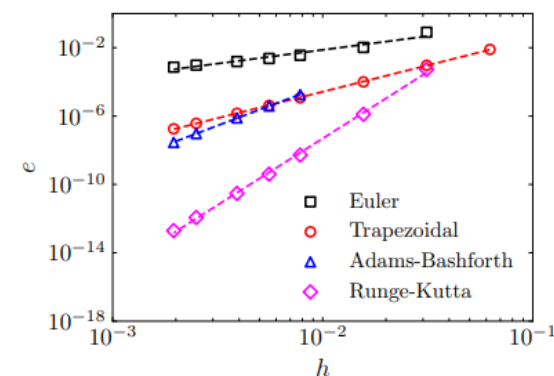


图 1: 各方法的 $l_2$ 误差 $e$ 随 $h$ 的变化, 虚线为最小二乘拟合结果.

Source Code 1: 问题1

```
1 import numpy as np
2 import pandas as pd
3 import matplotlib.pyplot as plt
4 from scipy.optimize import fsolve
5
```



# Thuthesis 清华大学学位论文模板

The image shows a LaTeX editor interface with two panes. The left pane displays the source code of the 'thuthesis' LaTeX template, and the right pane shows the rendered output.

**Source Code (Left Pane):**

```
1 % !TeX encoding = UTF-8
2 % !TeX program = xelatex
3 % !TeX spellcheck = en_US
4
5 \documentclass[degree=master]{thuthesis}
6 % 学位 degree:
7 % doctor | master | bachelor | postdoc
8 % 学位类型 degree-type:
9 % academic (默认) | professional
10 % 语言 language
11 % chinese (默认) | english
12 % 字体库 fontset
13 % windows | mac | fandol | ubuntu
14 % 建议终版使用 Windows 平台的字体编译
15
16
17 % 论文基本配置，加载宏包等全局配置
18 \input{thusetup}
19
20
21 \begin{document}
22
23 % 封面
24 \maketitle
25
26 % 学位论文指导小组、公开评阅人和答辩委员会名单
27 % 本科生不需要
28 \input{data/committee}
29
30 % 使用授权的说明
31 \copyrightpage
32 % 将签字扫描后授权文件 scan-copyright.pdf 替换原始页面
33 % \copyrightpage[file=scan-copyright.pdf]
34
35 \frontmatter
```

**Rendered Output (Right Pane):**

清华大学学位论文 L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 模板  
使用示例文档 v7.2.4  
(申请清华大学工学硕士学位论文)

培 养 单 位 : 计算机科学与技术系  
学 科 : 计算机科学与技术  
研 究 生 : 薛 瑞 尼  
指 导 教 师 : 郑 纬 民 教 授  
副 指 导 教 师 : 陈 文 光 教 授

二〇二二年十月

# 实验报告

清华大学

## 课程报告

题目：体点导热问题的火积优化

姓名：沈扬

学号：2021310957

系别：航天航空学院

课程：传热理论新进展

2022年1月9日

## 目录

1 问题简介 .....	1
2 火积理论 .....	2
2.1 最小热阻原理 .....	2
2.2 优化流程 .....	2
3 数值方法 .....	4
3.1 求解域 .....	4
3.2 数值离散方法 .....	4
3.3 迭代算法 .....	7
3.3.1 松弛因子选取 .....	7
3.3.2 网格无关性验证 .....	7
4 优化结果分析 .....	9
4.1 低导热系数比时的优化结果 .....	9
4.2 高导热系数比时的优化结果 .....	13
参考文献 .....	14

# 学术报告

研究背景 ○○○○○○ C4+ 替代模型构建 ○○○○○○○○○○ 基于神经网络的替代模型构建方法探究 ○○○○○○ 煤油热物性的分子动力学模拟研究 ○○○○○○○○○○ 结论 ○○○○

## 亚超临界 RP-3 航空煤油的热物性研究 毕业设计答辩

沈扬

清华大学航天航空学院, 工程热物理研究所

2021 年 9 月 3 日

指导教师: 曹炳阳



## Bias Dependence of Non-Fourier Heat Conduction in GaN HEMTs

Yang Shen

Department of Engineering Mechanics, School of Aerospace Engineering,  
Tsinghua University

August 14, 2022

谢谢大家!  
祝大家工作学习顺利! 🙏