



Lecture #1

Chapter 7 Compressible Flow: Some Preliminary Aspects

可压缩流动基础

Presented by Wenping Song

E-mail: wpsong@nwpu.edu.cn

2019年10月9日 Wednesday

Department of Fluid Mechanics, School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, China







Introduction of Aerodynamics

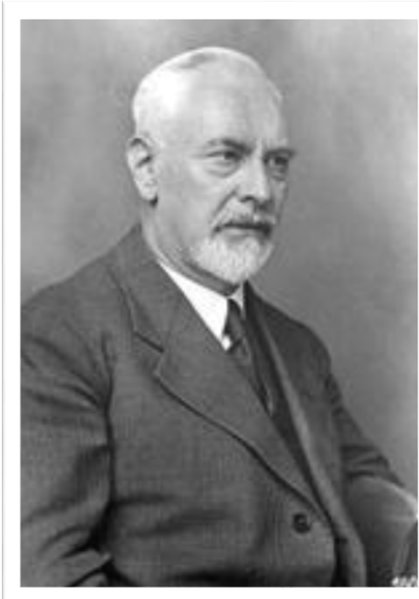
- ❑ What is Aerodynamics?
- ❑ What are the main applications of Aerodynamics?
- ❑ How important is Aerodynamics in modern aircraft design? \Rightarrow
- ❑ Did you hear about some giant men in the history of Aerodynamics? Such as
 - Ludwig Prandtl (1875-1953) 普朗特
 - Theodore von Karman (1881-1963) 冯.卡门
 - Adolf Busemaan (1901-1986) 阿道夫 布兹曼
 - Tsien H S (1911-2009) 钱学森

.....



可压缩空气动力学具有悠久的历史

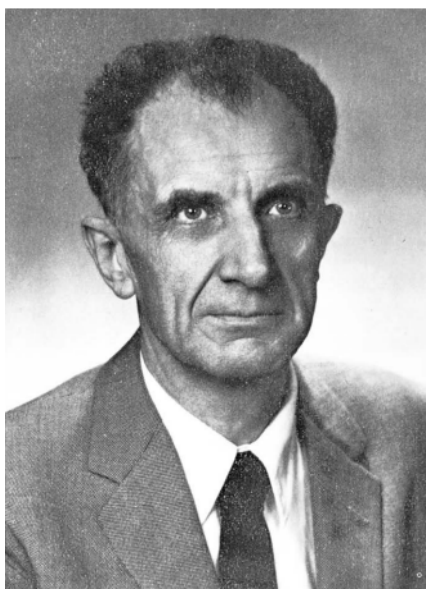
普朗特、布兹曼、冯·卡门、钱学森等世界著名科学家都对可压缩空气动力学做出过突出贡献



Ludwig Prandtl

(1875-1953) 普朗特

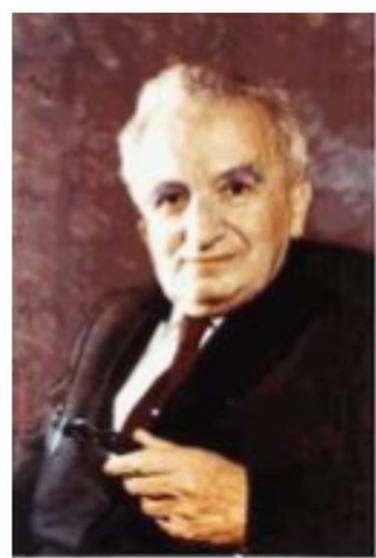
普朗特-格劳尔特压缩性修正
普朗特-迈耶膨胀波理论



Adolf Busemann

(1881-1963) 布兹曼

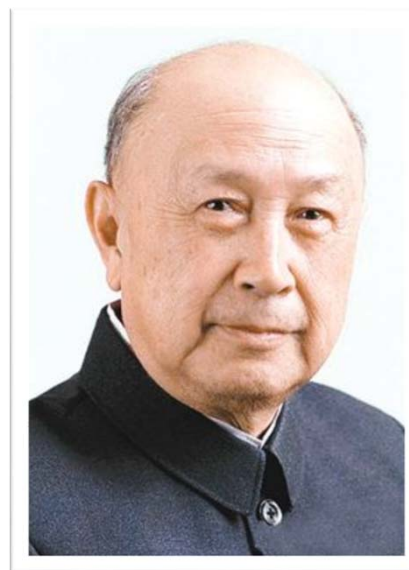
后掠翼
第一个超声速风洞



Theodore von Karman

(1881-1963) 冯 卡门

超声速时代之父
卡门-钱公式



Tsien H S

(1911-2009) 钱学森

高超声速相似律
卡门-钱公式



随着现代飞行器飞行速度不断提高，可压缩空气动力学成为飞行器设计与工程及相关专业学生必备的知识



共轴双旋翼直升机

$Ma = 0.35$ (463km/h)



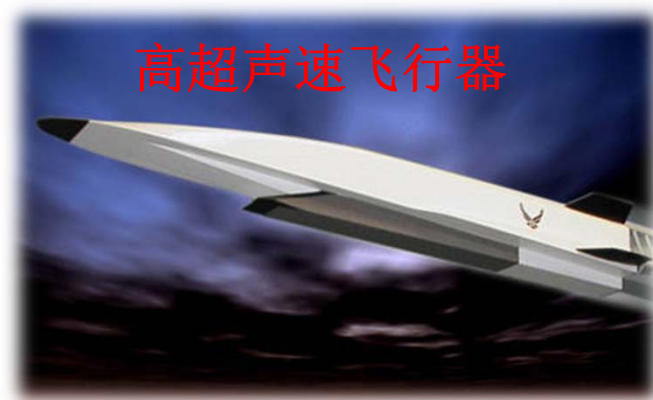
大型宽体客机

$Ma = 0.85$



超声速战斗机

$Ma = 2.5$



高超声速飞行器

$Ma = 5$



Chapter 7 Compressible Flow: Some Preliminary Aspects

第七章 可压缩流动：相关的预备知识



DC-3

长: 19.7m
翼展: 29.0m
高: 5.16m
空机重量: 8300kg
最大起飞重量: 11,400kg
最大速度: 370km/h
(7000米升限马赫数0.32)



A380

长: 73m
翼展: 79.8m
高: 24.1m
空机重量: 280,000kg
最大起飞重量: 560,000kg
巡航速度: 902km/h(巡航马赫数0.85)
巡航高度: 13100米



空气动力学研究内容分类

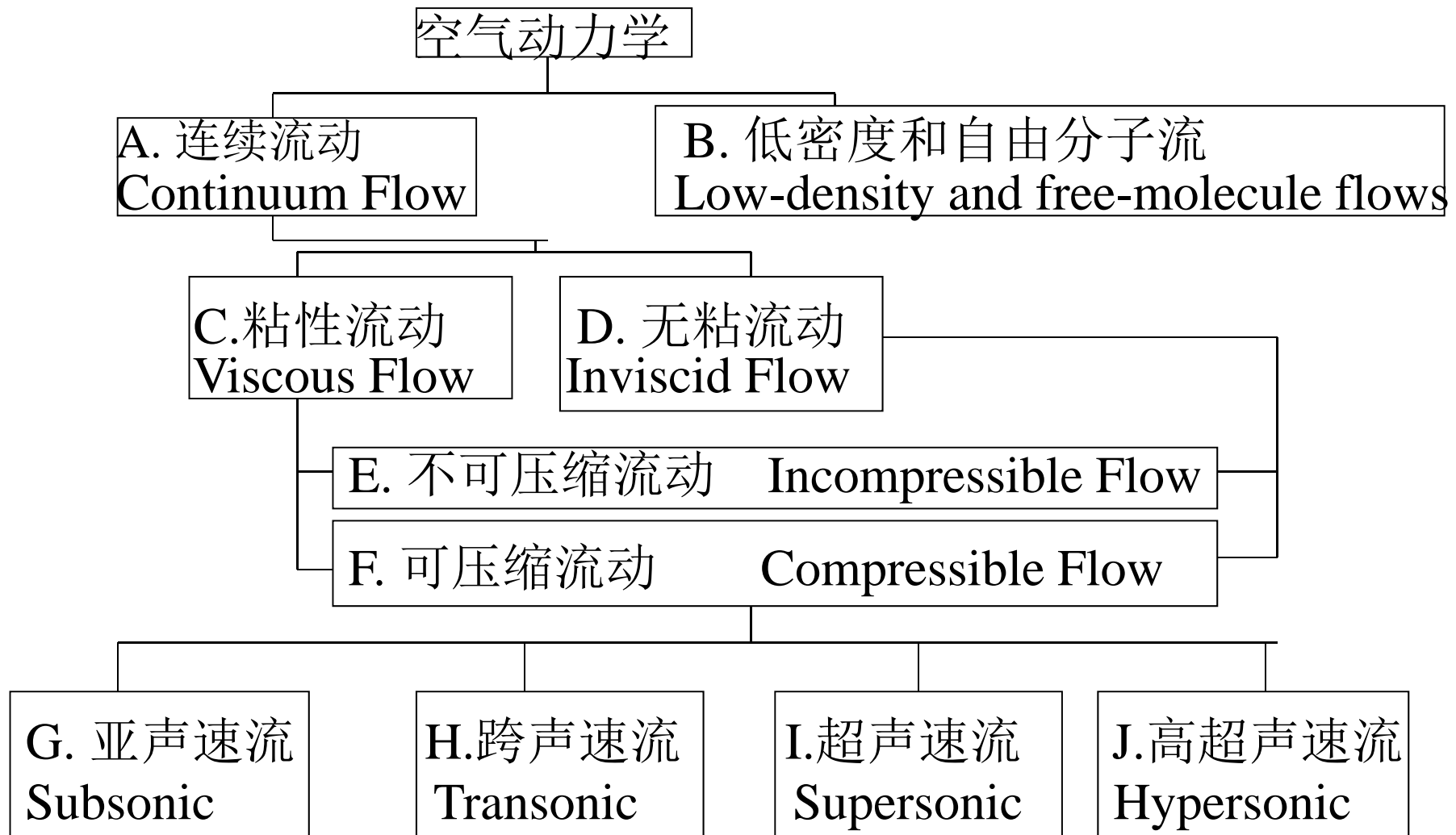


Fig 1.45 Block diagram categorizing the types of aerodynamic flows



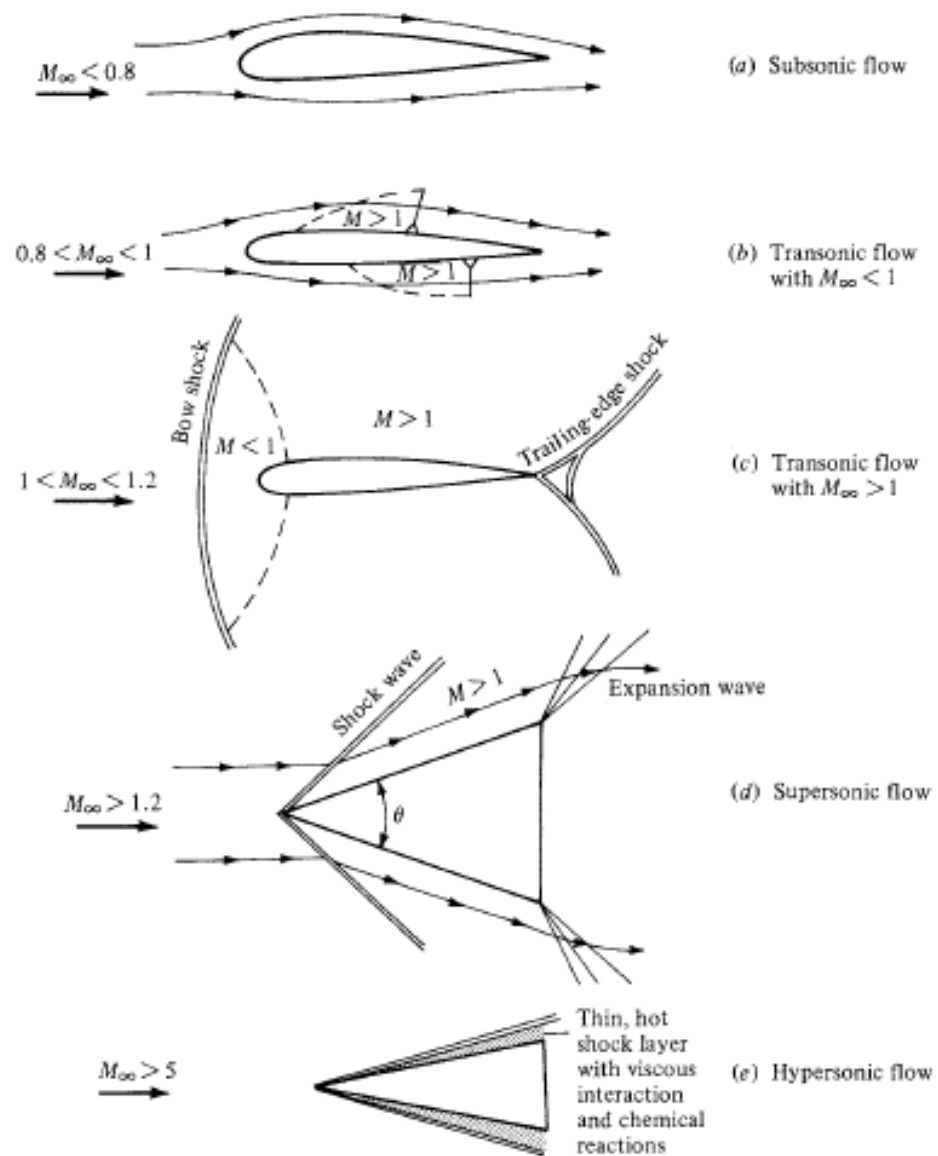


图1.44 不同流动速域

Figure 1.44 Different regimes of flow



按流动速度范围划分可压缩流动。

正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂

作答

可压缩流动的基本特征:

1)The pivotal aspect of high -speed flow is that **the density is a variable**——密度是变量.

2)Another pivotal aspect of high-speed compressible flow is energy. **A high-speed flow is a high energy flow.**

——是一个高能量的流动. →

3)Energy transformation and temperature changes are important considerations.——必须考虑能量转换与温度变化.

因此,研究可压缩流必须引入重要的热力学 (Thermodynamics) 。

热力学——研究能量及其转换规律的基础科学。

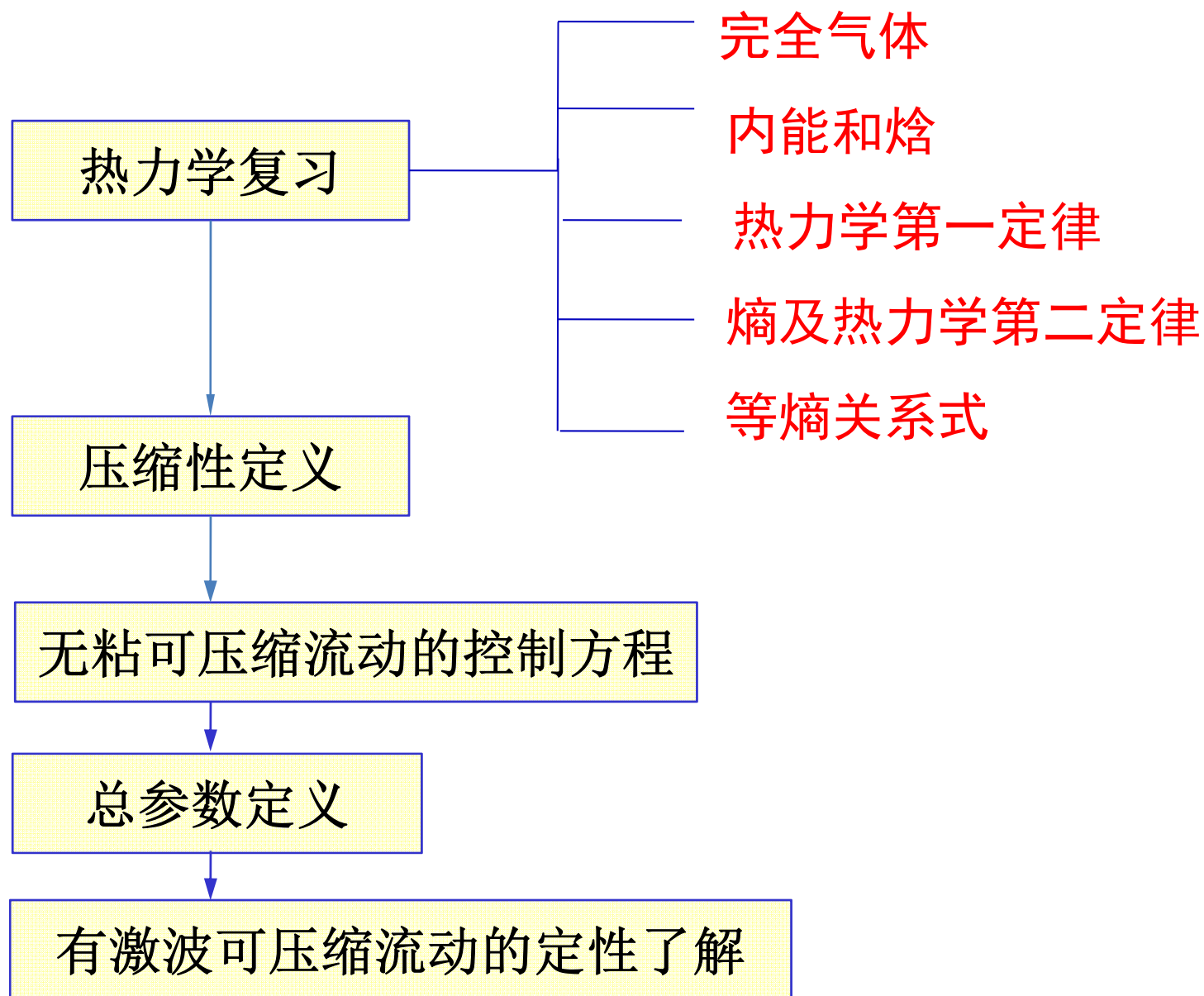


In contrast to the low speed, incompressible flows, what are the pivotal aspects of compressible flows?

- ☒ **A 密度是变化的**
- ☒ **B 是一个高能量的流动**
- ☐ **C 速度是变化的**
- ☐ **D 压强是变化的**

提交

第七章路线图



7.2 A BRIEF REVIEW OF THERMODYNAMICS

(热力学简要复习)

7.2.1 Perfect gas (完全气体)

定义:

A gas in which the intermolecular forces are neglected is defined as a *perfect gas*. (忽略分子间作用力的气体定义为完全气体)

完全气体满足 状态方程: (*equation of state*)

$$p = \rho RT \quad (7.1)$$

$$pv = RT \quad (7.2)$$

R为气体常数 (specific gas constant) $R=287J/(kg \cdot K)$



What is the definition of perfect gas ?

- ☒ A 忽略分子间作用力，满足状态方程 $p = \rho RT$
- ☐ B 温度不变
- ☐ C 压强不变
- ☐ D 密度不变

提交

气体常数R的单位是

- ☐ A $\text{J}/(\text{kg})$
- ☒ B $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
- ☐ C $\text{N}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
- ☐ D $\text{J}/(\text{K})$

提交

7.2.2 Internal Energy and Enthalpy (内能和焓)

内能的物理意义:

微观形式的能量总和, 与分子结构和分子运动活跃程度有关

分子以一定速度在空间运动: 平动动能

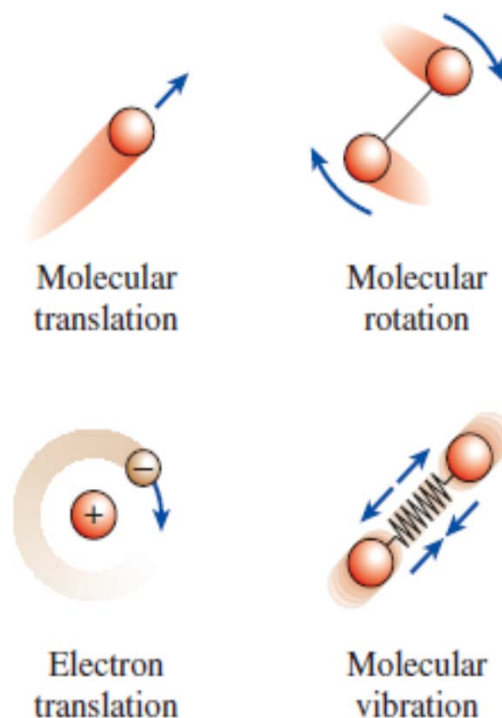
多原子分子的原子绕分子轴转动: 转动动能

多原子分子的原子在其共同质心附近振动:

振动势能和动能

原子的电子绕其原子核运动的动能, 自身

旋转的动能: 电子能



The energy of a given molecule is the sum of its *translational, rotational, vibrational, and electronic energies*.

（一个给定分子的能量是其平动动能、转动动能、振动能和电子能的总和。）

对于由大量分子组成的给定体积的气体，所有分子所具有的能量总和称为气体的内能。

单位质量气体的内能称为气体的比内能。（The internal energy per unit mass of gas is defined as the specific internal energy.）用 e 表示。



□ 要注意区分流体的**宏观**动能和构成流体内能的分子**微观**运动动能，前者是流体整体有序运动的动能；相反，后者是分子的随机、无序运动的动能。很显然，前者更有用。（见右图）

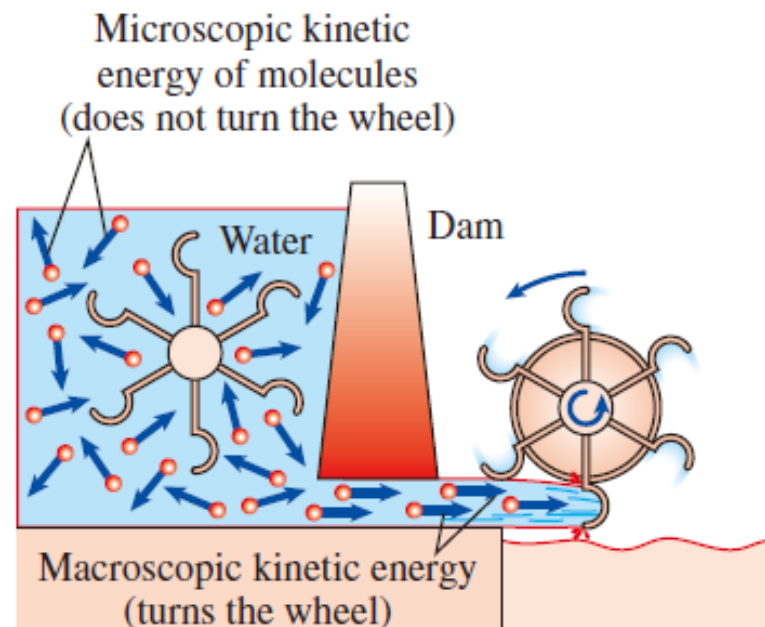


FIGURE 2-8

The *macroscopic* kinetic energy is an organized form of energy and is much more useful than the disorganized *microscopic* kinetic energies of the molecules.

□ 热力学的主要应用就是将无序能量（热）转化为有序能量（功）。



一个气体分子的内能主要由那些能组成？

☒ A 平动动能

☒ B 转动动能

☒ C 振动能

☒ D 电子能

提交

与比内能 e 相联系的另一个量为比焓 h ，定义为：

$$h = e + pv = e + \frac{p}{\rho} \quad (7.3)$$

焓 h 的表达式中的 pv 项表示了将单位质量的流体推入或吸出体积 v (比容) 所需做的功，代表了流体所具有的压力势能。在本章第5节我们将看到，用焓表示能量方程可使能量方程表达式更简炼。

对于完全气体， e 和 h 都只是温度的函数：

$$e = e(T) \quad (7.4a)$$

$$h = h(T) \quad (7.4b)$$



$$de = c_v dT \quad (7.5a)$$

$$dh = c_p dT \quad (7.5b)$$

c_v —— 定容比热

Specific heat at constant
volume

c_p —— 定压比热

Specific heat at constant
pressure



$T < 1000\text{ K}$, 气体为量热完全气体 (*calorically perfect gas*),

c_v 、 c_p 为常数

$$e = c_v T \quad (7.6a)$$

$$h = c_p T \quad (7.6b)$$

注意: e 和 h 均为热状态变量 (**thermodynamic state variables**),
它们只依赖于气体的状态而与过程无关。

(They depend only on the state of the gas and are independent of any process)

Note: 定义 $T=0$ 时 $e=0$, $h=0$



$$e = c_v T \quad (7.6a)$$

$$h = c_p T \quad (7.6b)$$

(7.6b)-(7.6a):

$$h - e = pv = c_p T - c_v T$$

而

$$pv = RT$$

所以有:

$$c_p - c_v = R \quad (7.7)$$



定义比热比

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v}$$

(对于量热完全气体: $\gamma = 1.4$)

$$1 - \frac{c_v}{c_p} = \frac{R}{c_p} \quad (7.8)$$

$$1 - \frac{1}{\gamma} = \frac{R}{c_p}$$

$$c_p = \frac{\gamma R}{\gamma - 1} \quad (7.9)$$

$$c_v = \frac{R}{\gamma - 1} \quad (7.10)$$



Example 7.1 一房间体积为 $5 \times 7 \times 3.3 m^3$ ，房间中空气压强和温度分别为1大气压和25摄氏度。计算房间中空气的内能和焓。

$$\rho = \frac{p}{RT} = \frac{1.01 \times 10^5 (N / m^2)}{287 (J / kg \cdot K) \times (273 + 25) K} \\ = 1.181 (kg / m^3)$$

$$M = \rho \times V = (1.181) \times (5 \times 7 \times 3.3) = 136.4 (kg)$$



$$c_v = \frac{R}{\gamma - 1} = \frac{287}{1.4 - 1} = 717.5 (J/kg \cdot K)$$

$$e = c_v T = 717.5 \times (25 + 273) = 2.138 \times 10^5 (J/kg)$$

$$E = Me = 136.4 \times 2.138 \times 10^5 = 2.92 \times 10^7 J$$



$$c_p = \frac{\gamma R}{\gamma - 1} = \frac{1.4 \times 287}{0.4} = 1004.5 (J / kg \cdot K)$$

$$h = c_p T = 1004.5 \times (25 + 273) = 2.993 \times 10^5 (J/kg)$$

$$E = Mh = 136.4 \times 2.993 \times 10^5 = 4.08 \times 10^7 J$$

作业: Problem 7.1, 7.2



7.2.3 First Law of Thermodynamics (热力学第一定律)

系统—system 环境-surroundings 边界-boundary

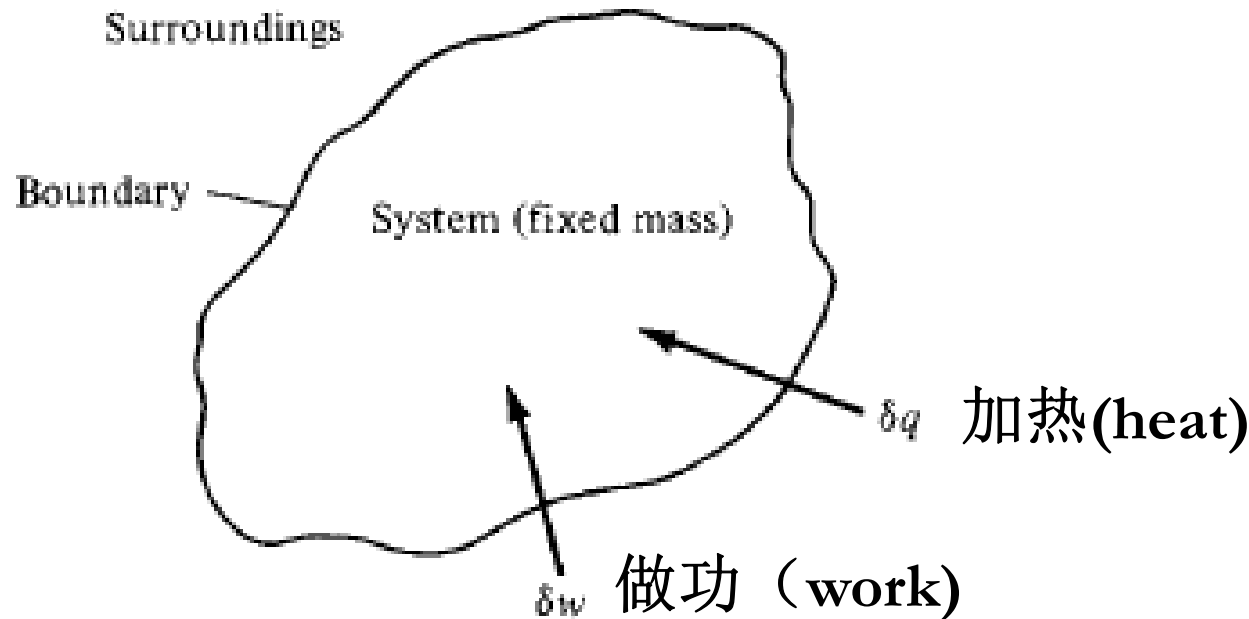


Figure 7.2 Thermodynamic system.

系统：具有固定质量的气体（研究对象）

环境：系统之外的区域

边界：系统与环境的交接面



系统能量的形式:

- ◆ 储存在系统内的能量: 静态能
- ◆ 没有储存在系统中的能量: 动态形式的能量, 穿过边界会引起系统能量的损失或获得, 即可以引起系统与外界的能量交换

系统与外界的能量交换可以通过加热(heat)、做功 (work)、质量流 (mass flow)实现。对于我们研究的封闭系统 (closed system), 我们不考虑质量流, 只有热传递和做功。



Heat is defined as the form of energy that is transferred between a system and its surroundings by virtue of a temperature difference.

(热是一种能量形式，它通过系统与外界的温度差在系统与外界之间传递。)

heat transfer: Temperature is the driving force for heat transfer. The larger the temperature difference, the higher is the rate of heat transfer.

(温度差是热传递的驱动力，温度差越大，热传递率越大。)

热传递的形式: Conduction(传导), Convection (对流), Radiation (辐射)。



Work: Work is the energy transfer associated with a force acting through a distance. （功是力与力的作用距离相联系的能量形式）

加热和做功的共同特征：

- 1、都通过系统边界作用于系统。
- 3、热和功都和过程相联系，热和功不是状态量。
- 3、它们都是路径的函数。（即它们的大小依赖于过程和状态）。

对于系统而言，系统拥有能量，而不是热和功。



$$\delta q$$

: 外界通过边界加于系统的热增量（与过程有关，用 δ 作增量符号）；

$$\delta w$$

: 外界对系统做的功（与过程有关，用 δ 作增量符号）；

$$de$$

: 系统内能的增量（与过程无关，用全微分符号 d 作增量符号）；

Assume this system is stationary: (假定系统为静止的)

$$\delta q + \delta w = de \quad (7.11)$$



要使系统产生内能增量 de ，有无数多种给系统加热和对系统做功的方式（过程）。

--For a given de , there are in general an infinite number of different ways (processes) by which heat can be added and work done on the system.



在空气动力学中我们主要考虑三个常见过程：

- 1 . **Adiabatic process** (绝热过程, $\delta q = 0$)
A process during which there is no heat transfer.
在过程中没有热传递。
- 2 . **Reversible process** (可逆过程, $\delta w = -p dv$)
No dissipative phenomena occur. 没有耗散现象发生.
(No viscosity, No thermal conductivity, No mass diffusion)
(没有粘性、热传导、质量扩散)
- 3 . **Isentropic process** (等熵过程)
绝热、可逆。

强调：对于可逆过程，做功可以表示为：

$$\delta w = -p dv$$



绝热过程的热力学第一定律表达: $\delta w = de$

可逆过程的热力学第一定律表达: $\delta q - p dv = de$ (7.12)

等熵过程的热力学第一定律表达: $-p dv = de$

热力学第一定律小结:

热力学第一定律就是能量守恒原理的一种表达,说明能量既不能产生也不能消失,只能从一种形式转换为另一种形式。

违反热力学第一定律的热机称为第一类永动机。

(Perpetual motion machine)



■补充:

•可逆过程的理解:

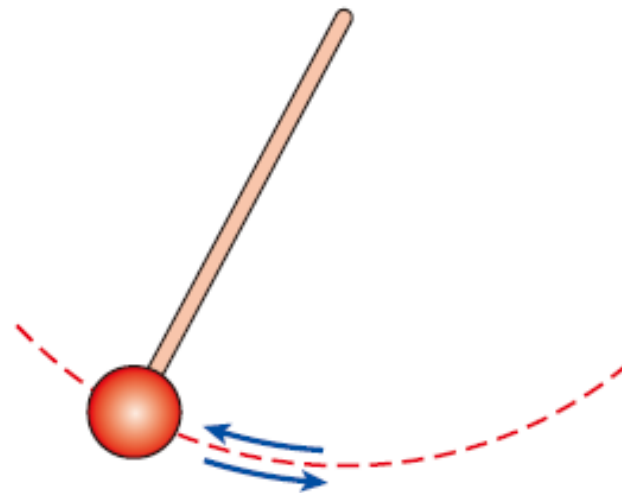
可逆过程的定义: 对于一个给定的系统和它的外界, 如果它们完全可以由终止状态回到他们的初始状态, 这样的过程就是可逆过程。

热力学研究的是平衡的系统。处于平衡状态的系统内没有力的不平衡, 没有温度的梯度, 没有质量的扩散。

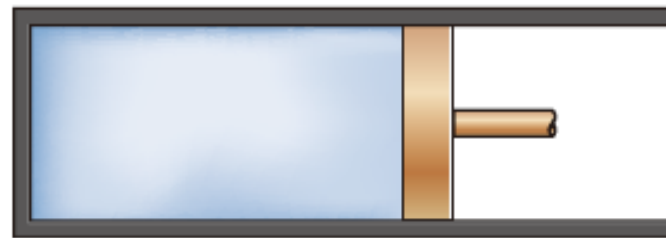
可逆过程举例:

- 1、无摩擦的摆锤
- 2、气体的准平衡膨胀与压缩





(a) Frictionless pendulum



(b) Quasi-equilibrium expansion
and compression of a gas

FIGURE 6–29

Two familiar reversible processes.



* 不可逆过程:
举例: 不可逆现象

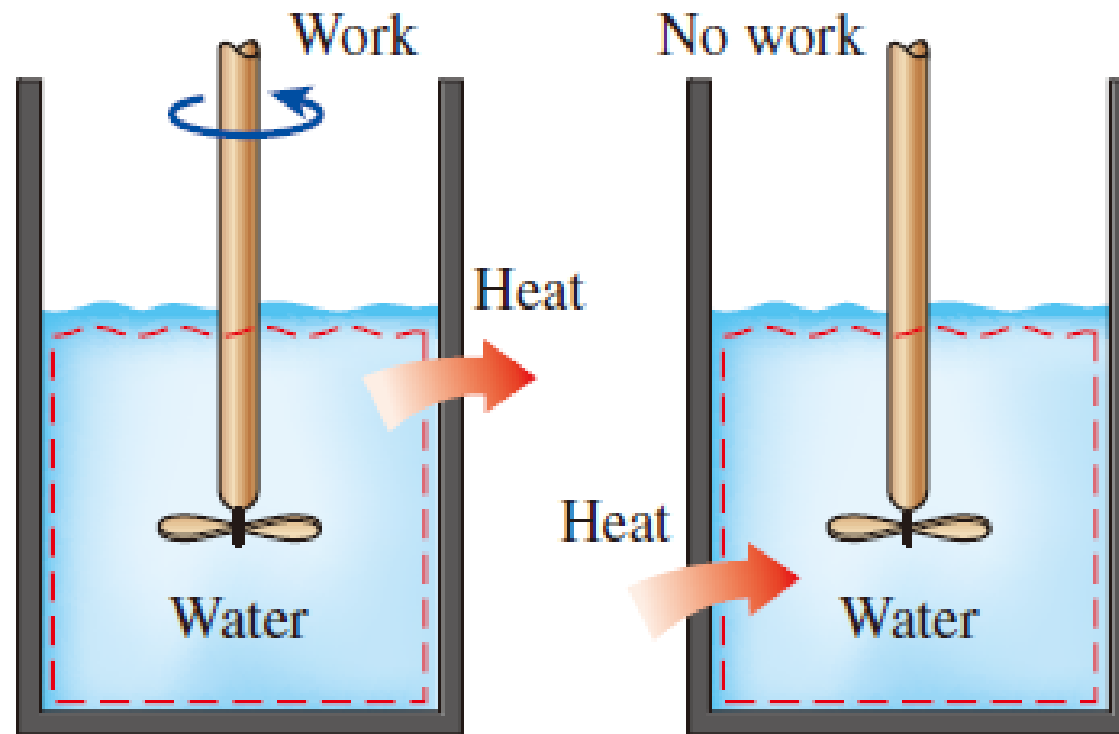


FIGURE 6-8

Work can always be converted to heat directly and completely, but the reverse is not true.



空气动力学中最常见的热力学过程是：

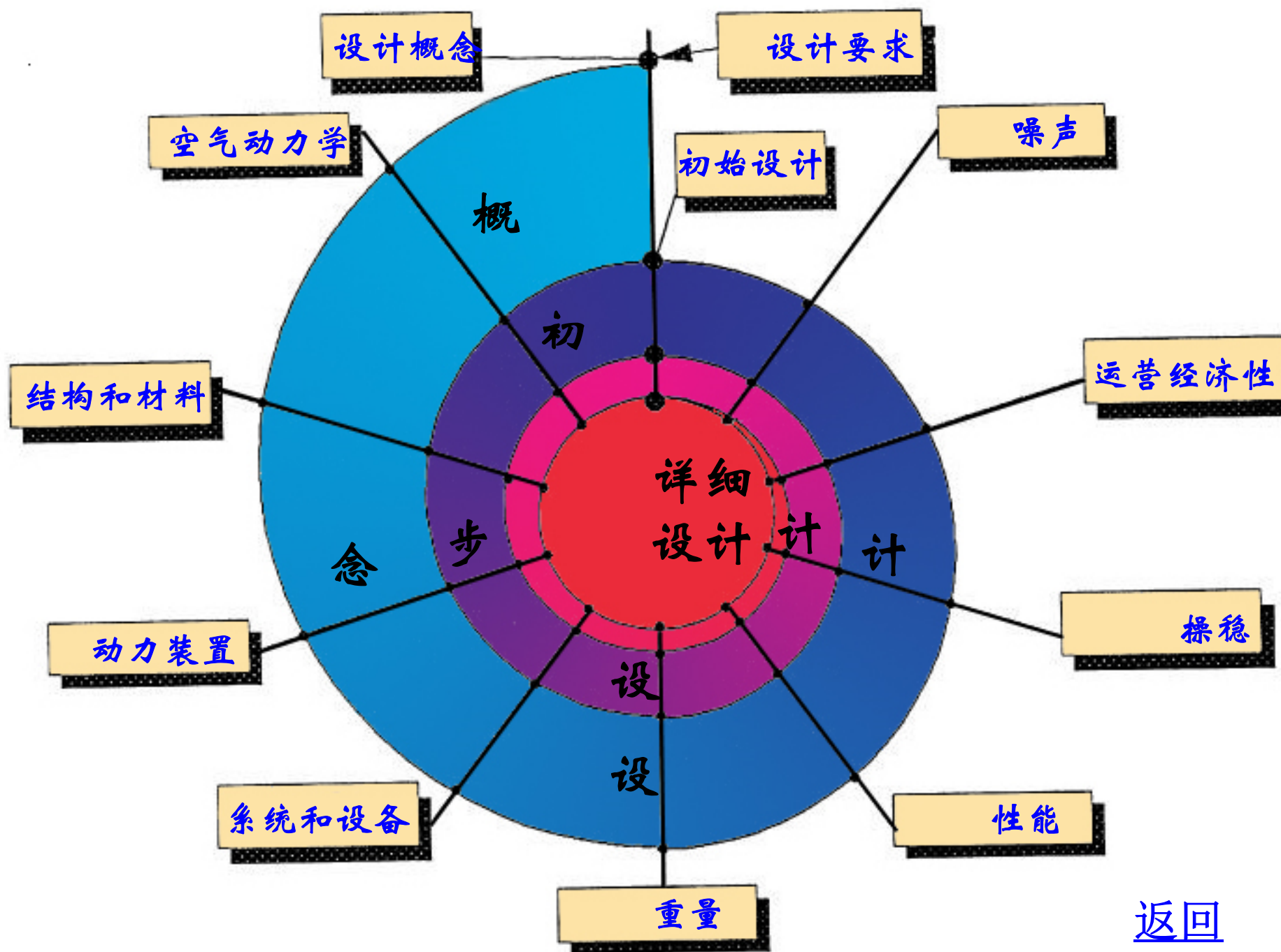
- ☐ A 等温过程
- ☐ B 等压过程
- ☒ C 绝热过程、可逆过程、等熵过程
- ☐ D 等容过程

提交

Problem 7.1, 7.2

End of Lecture #1 !





[返回](#)

高速流动是高能量的流动:

标准海平面大气下的1kg空气气体以两倍声速运动的动能 $TE=2.31\times 10^5\text{J}$

而内能为: $e=2.07\times 10^5\text{J}$

$$TE/e=115.6\%$$

对比:

低速流动:

标准海平面大气下的1kg空气气体以0.3倍声速运动的动能 $TE=5.202\times 10^3\text{J}$

而内能为: $e=2.07\times 10^5\text{J}$

$$5.202 \times 10^3 / 2.07 \times 10^5 = 2.51\%$$

$$TE/e=2.51\%$$

[返回](#)

