

**PGS.PTS. Bùi Hải - PTS. Hoàng Ngọc Đông**

Bài tập  
**Kỹ thuật nhiệt**

Nhà xuất bản khoa học và kỹ thuật  
Hà nội -1999

## Lời nói đầu

Cuốn “Bài tập kỹ thuật nhiệt” này được biên soạn theo nội dung cuốn giáo trình “Kỹ thuật nhiệt” của tác giả Bùi Hải và Trần Thế Sơn, do nhà xuất bản Khoa học và kỹ thuật phát hành đang được sử dụng cho việc đào tạo các hệ kỹ sư ở các trường đại học Kỹ thuật.

Cuốn “Bài tập kỹ thuật nhiệt” này được biên soạn theo kinh nghiệm giảng dạy lâu năm của các tác giả nhằm đáp ứng nhu cầu học tập của sinh viên các trường đại học Kỹ thuật. Cuốn sách trình bày tóm lược nội dung lý thuyết từng phần, sau đó chủ yếu là bài tập đã được giải sẵn, ở đây các tác giả chú ý đến các dạng bài tập ngắn, nhằm phục vụ cho cách thi trắc nghiệm là cách thi mới của môn học đang được sử dụng ở một số trường đại học kỹ thuật.

Sách gồm 2 phần 4 chương và phần phụ lục được phân công biên soạn như sau: PGS. PTS. Bùi Hải, trường đại học Bách khoa Hà Nội là chủ biên và soạn chương 1, chương 2 của phần I; PTS. Hoàng Ngọc Đồng biên soạn, trường đại học Kỹ thuật Đà Nẵng soạn chương 3, chương 4 của phần II và phần phụ lục. Trong quá trình biên soạn chắc chắn không tránh khỏi sai sót, mong nhận được sự góp ý của bạn đọc.

Các tác giả

## Phần I

## nhệt động kỹ thuật

### Chương 1.

#### phương trình trạng thái

#### Và các quá trình nhệt động của chất khí

##### 1.1. Thông số trạng thái

##### 1.1.1. Nhệt và công

Nhiệt ký hiệu là  $Q$ , đơn vị là J hoặc  $q = \frac{Q}{G}$ , đơn vị là J/kg, với  $G$  là khối lượng của môi chất tính theo kg. Công ký hiệu là  $L$ , đơn vị là J hoặc  $l = \frac{L}{G}$ , đơn vị là J/kg.

Nhiệt lượng và công không phải là thông số trạng thái mà là hàm của quá trình. đơn vị đo của năng lượng nói chung là J (Jun), ngoài ra còn có thể sử dụng các đơn vị chuyển đổi sau:

$$1\text{kJ} = 10^3\text{J}; 1\text{MJ} = 10^3\text{kJ} = 10^6\text{J};$$

$$1\text{cal} = 4,18\text{J}; 1\text{kcal} = 4,18\text{kJ}; 1\text{BTU} \approx 0,3\text{J}.$$

Qui ước dấu của nhệt và công như sau: môi chất nhận nhệt  $Q > 0$ , môi chất nhả nhệt  $Q < 0$ ; môi chất sinh công  $L > 0$ , môi chất nhận công  $L < 0$ .

##### 1.1.2. Thông số trạng thái

###### a) Thể tích riêng

Thể tích riêng được xác định theo công thức sau:

$$v = \frac{V}{G} [\text{m}^3/\text{kg}], \quad (1-1)$$

trong đó:

-  $V$ - Thể tích riêng,  $\text{m}^3$ ,

-  $G$  — Khối lượng,  $\text{kg}$ ,

Khối lượng riêng (hay mật độ)  $\rho$  là đại lượng nghịch đảo của thể tích riêng:

$$\rho = \frac{G}{V} [\text{kg}/\text{m}^3], \quad (1-2)$$

###### b) áp suất

áp suất được ký hiệu là  $p$ , đơn vị là  $\text{N}/\text{m}^2 = 1\text{Pa}$  (Pascal). Ngoài ra còn có thể dùng các đơn vị đo khác như sau:

$$1\text{Kpa} = 10^3\text{Pa}; 1\text{Mpa} = 10^3\text{Kpa} = 10^6\text{Pa}.$$

$$1\text{bar} = 10^5\text{N}/\text{m}^2 = 10^5\text{Pa} = 750\text{mmHg}$$

$$1\text{at} = 0,98\text{bar} = 735,5\text{mmHg} = 10\text{m H}_2\text{O}$$

$$1\text{Psi} = 6895\text{pa} \approx 0,07\text{at}$$

mmHg còn được coi là tor.

Các qui đổi trên theo *mmHg* ở  $0^{\circ}\text{C}$ , nếu cột *mmHg* đo ở nhiệt độ khác  $0^{\circ}\text{C}$ , muốn tính chính xác phải qui đổi cột *mmHg* về  $0^{\circ}\text{C}$  rồi mới dùng quan hệ qui đổi trên như sau:

$$h_0 = h_t(1 - 0,000172t) \quad (1-3)$$

trong đó:

$h_0$  là chiều cao cột thủy ngân qui đổi về  $0^{\circ}\text{C}$ ;

$h_t$  là chiều cao cột thủy ngân đo ở nhiệt độ  $t$ ;

$t$  là nhiệt độ,  $^{\circ}\text{C}$ .

áp suất tuyệt đối là  $p$  là áp suất thực của môi chất.

Giữa áp suất tuyệt đối  $p$ , áp suất thực  $p_0$  của khí quyển, áp suất dư  $p_d$  và độ chân không  $p_{ck}$ ,  $p_{ck} = p - p_0$ , có quan hệ như sau:

$$p = p_0 + p_d \quad (1-4)$$

$$p = p_0 - p_{ck} \quad (1-5)$$

c) *Nhiệt độ*

Thang nhiệt độ theo nhiệt độ bách phân có ký hiệu  $t$ , đơn vị  $^{\circ}\text{C}$ ; theo nhiệt độ tuyệt đối có ký hiệu  $T$ , đơn vị  $^{\circ}\text{K}$ ; thang nhiệt độ Farenhet, có ký hiệu  $t_f$  đơn vị  $^{\circ}\text{F}$ . Giữa chúng có mối quan hệ như sau:

$$T (^{\circ}\text{K}) = 273,15 + t (^{\circ}\text{C}) \quad (1-6)$$

$$dT = dt; \Delta T = \Delta t$$

$$t (^{\circ}\text{C}) = \frac{5}{9}(t_f - 32) \quad (1-7)$$

d) *Nội năng*

Nội năng ký hiệu là  $U$ , đơn vị là  $\text{J}$  hoặc  $u$ , đơn vị là  $\text{J/kg}$ . Nội năng ở đây là năng lượng chuyển động của các phân tử (nội nhiệt năng). Biến đổi nội năng của khí lý tưởng trong mọi quá trình theo các quan hệ sau đây:

$$du = C_v dT \quad (1-8)$$

$$\Delta U = G \cdot \Delta u = G \cdot C_v (T_2 - T_1) \quad (1-9)$$

ở đây  $C_v$  là nhiệt dung riêng khối lượng đẳng tích.

Khí lý tưởng là khí thực bỏ qua lực tác dụng tương hỗ giữa các phân tử và thể tích bản thân các phân tử. Ví dụ khí  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}_2$ , không khí . . . . ở điều kiện nhiệt độ và áp suất thường đều được coi là khí lý tưởng.

e) *Năng lượng đẩy*

Năng lượng đẩy là Năng lượng chỉ có trong hệ hở để giúp môi chất chuyển động ra hoặc vào hệ

f) *Entanpi:*

Entanpi có ký hiệu  $I$ , đơn vị  $\text{J}$  hoặc  $i$ , đơn vị  $\text{J/kg}$ , cũng có thể ký hiệu bằng  $H$ , đơn vị  $\text{J}$  hoặc  $h$ , đơn vị  $\text{J/kg}$ . Ta có quan hệ:

$$i = u + pv; j/\text{kg} \quad (1-10)$$

Biến đổi Entanpi của khí lý tưởng trong mọi quá trình theo các quan hệ sau đây:

$$di = C_p dT \quad (1-11)$$

$$\Delta I = G \cdot \Delta i = G \cdot C_p(T_2 - T_1) \quad (1-12)$$

g) Entropi:

Entropi có ký hiệu bằng S, đơn vị J/K hoặc s, đơn vị J/kg.K. Biến đổi Entropi theo các quan hệ sau đây:

$$ds = \frac{dq}{T}, \quad (1-13)$$

T- Nhiệt độ tuyệt đối của môi chất.

h) Execgi và anergi

Execgi có ký hiệu là E, đơn vị J hoặc e đơn vị J/kg. Execgi là phần năng lượng có thể biến đổi hoàn toàn thành công trong các quá trình thuận nghịch. Anergi có ký hiệu là A, đơn vị J hoặc a đơn vị J/kg. Anergi là phần năng lượng nhiệt không thể biến đổi hoàn toàn thành công trong quá trình thuận nghịch.

Với nhiệt q ta có quan hệ sau:

$$q = e + a \quad (1-14)$$

trong đó:

e là execgi, J/kg;

a là anergi, J/kg;

Execgi của nhiệt lượng q ở nhiệt độ T khác nhiệt độ môi trường  $T_0$  được xác định theo quan hệ sau:

$$e = q \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right) \quad (1-15)$$

Execgi của dòng môi chất chuyển động được xác định theo quan hệ sau:

$$e = i - i_0 - T_0(s - s_0) \quad (1-16)$$

trong đó:

i, s — entanpi và entropi của môi chất ở nhiệt độ T, áp suất p khác với nhiệt độ môi trường  $T_0$ , áp suất môi trường  $p_0$ ;

$i_0, s_0$  — entanpi và entropi của môi chất ở nhiệt độ  $T_0, p_0$ ;

## 1.2 phương trình trạng thái của chất khí

Phương trình viết cho 1kg

$$pv = RT \quad (1-17a)$$

Phương trình viết cho 1kg

$$pV = GRT \quad (1-17b)$$

trong đó:

p — tính theo N/m<sup>2</sup>, T tính theo <sup>0</sup>K;

R — Hằng số chất khí, được xác định bằng biểu thức:

$$R = \frac{8314}{\mu}, \text{ J/kg}^0\text{K} \quad (1-18)$$

$\mu$  - kilomol của khí lý tưởng, kg/kmol (có trị số bằng phân tử lượng);

G- Khối lượng khí, kg.

Phương trình viết cho 1kilomol khí lý tưởng:

$$pV_{\mu} = R_{\mu}T = 8314T \quad (1-19)$$

trong đó:

$V_{\mu}$  - thể tích của 1kmol khí;

$$V_{\mu} = v_{\mu} \cdot \mu, \text{ m}^3/\text{kmol},$$

$R_{\mu}$  - Hằng số của khí lý tưởng,  $R_{\mu} = 8314 \text{ J/kmol.K}$

Phương trình viết cho M kilomol khí lý tưởng:

$$PV = M.R_{\mu}T = 8314.M.T \quad (1-20)$$

M — số kilomol khí;

### 1.3. Nhiệt dung riêng của chất khí

#### 1.3.1. Các loại nhiệt dung riêng

- Nhiệt dung riêng khối lượng: đơn vị đo lường mỗi chất là kg, ta có nhiệt dung riêng khối lượng, ký hiệu C, đơn vị J/kg. °K.

- Nhiệt dung riêng thể tích, ký hiệu  $C'$ , đơn vị  $\text{J/m}^3_{v/c}$ . °K.

- Nhiệt dung riêng mol ký hiệu  $C_{\mu}$ , đơn vị J/kmol. °K.

Quan hệ giữa các loại nhiệt dung riêng:

$$C = v_{v/c} \cdot C' = \frac{1}{\mu} C_{\mu} \quad (1-20)$$

$V_{tc}$  — thể tích riêng ở điều kiện tiêu chuẩn vật lý ( $t_0 = 0^{\circ}\text{C}$ ,  $p_0 = 760 \text{ mmHg}$ ).

- Nhiệt dung riêng đẳng áp  $C_p$ ,  $C_p$ ,  $C'_p$ , - nhiệt dung riêng khi quá trình xảy ra ở áp suất không đổi  $p = \text{const}$ .

- Nhiệt dung riêng đẳng tích  $C_v$ :

thể tích không đổi, ta có nhiệt dung riêng đẳng tích  $C_v$ ,  $C'_v$ ,  $C_{\mu v}$ , - nhiệt dung riêng khi quá trình xảy ra ở thể tích không đổi  $V = \text{const}$ .

Quan hệ giữa nhiệt dung riêng đẳng áp và nhiệt dung riêng đẳng tích của khí lý tưởng:

$$C_p - C_v = R. \quad (1-22)$$

$$C_p = k.C_v. \quad (1-23)$$

K — số mũ đoạn nhiệt.

#### 1.3.2. Nhiệt dung riêng là hằng số và nhiệt dung riêng trung bình

Với khí lý tưởng, nhiệt dung riêng không phụ thuộc vào nhiệt độ và là hằng số được xác định theo bảng 1.1.

**Bảng 1.1.** nhiệt dung riêng của khí lý tưởng

Loại khí	Trị số K	Kcal/kmol. °K		KJ/kmol. °K	
		$C_{\mu v}$	$C_{\mu p}$	$C_{\mu v}$	$C_{\mu p}$
Một nguyên tử	1,6	3	5	12,6	20,9
Hai nguyên tử ( $\text{N}_2, \text{O}_2 \dots$ )	1,4	5	7	20,9	29,3
Ba hoặc nhiều nguyên tử ( $\text{CO}_2, \text{HO}_2, \dots$ )	1,3	7	9	29,3	37,7

Với khí thực, nhiệt dung riêng phụ thuộc vào nhiệt độ nên ta có khái niệm nhiệt dung riêng trung bình. Nhiệt dung riêng trung bình từ  $0^{\circ}\text{C}$  đến  $t^{\circ}\text{C}$  được ký hiệu  $\bar{C}_0^t$  và cho trong các bảng ở phần phụ lục. Nhiệt dung riêng trung bình từ  $t_1$  đến  $t_2$  ký hiệu  $\bar{C}_{t_1}^{t_2}$  hay  $C_{tb}$ , được xác định bằng công thức:

$$\bar{C}_{t_1}^{t_2} = \frac{1}{t_2 - t_1} \left[ t_2 \cdot \bar{C}_0^{t_2} - t_1 \cdot \bar{C}_0^{t_1} \right] \quad (1-24)$$

### 1.4.3. Tính nhiệt theo nhiệt dung riêng

thông thường nhiệt lượng được tính theo nhiệt dung riêng khối lượng:

- với quá trình đẳng áp:

$$Q = G \cdot C_p \cdot (t_2 - t_1) \quad (1-25)$$

- với quá trình đẳng tích:

$$Q = G \cdot C_v \cdot (t_2 - t_1) \quad (1-26)$$

- với quá trình đa biến:

$$Q = G \cdot C_n \cdot (t_2 - t_1) \quad (1-27)$$

Trong các công thức trên:

$Q$  — nhiệt lượng, kJ;

$C_p$  - nhiệt dung riêng khối đẳng áp, kJ/kg. $^{\circ}\text{K}$ .

$C_v$  - Nhiệt dung riêng khối lượng đẳng tích, kJ/kg. $^{\circ}\text{K}$ .

$C_n$  - Nhiệt dung riêng khối lượng đa biến, kJ/kg. $^{\circ}\text{K}$ .

## 1.4. Bảng và đồ thị của môi chất

Với các khí  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ , không khí . . . ở điều kiện bình thường có thể coi là khí lý tưởng và các thông số được xác định bằng phương trình trạng thái khí lý tưởng đã nêu ở phần trên. Với nước, môi chất lạnh, . . . không khí có thể coi là khí lý tưởng nên các thông số được xác định theo các bảng số hoặc đồ thị của chúng.

### 1.4.1. Các bảng số của nước hoặc môi chất lạnh ( $\text{NH}_3$ , $\text{R}_{12}$ , $\text{R}^{22}$ . . .)

Để xác định các thông số của chất lỏng sôi hoặc hơi bão hoà khô, ta sử dụng bảng hơi bão hoà theo nhiệt độ hoặc theo áp suất cho trong phần phụ lục. ở đây cần lưu ý các thông số của chất lỏng sôi được ký hiệu với một dấu phẩy, ví dụ:  $v'$ ,  $p'$ ,  $i'$ , . . . còn các thông số của hơi bão hoà khô được ký hiệu với hai dấu phẩy, ví dụ:  $v''$ ,  $p''$ ,  $i''$ , . . . Trong các bảng và đồ thị không cho ta giá trị nội năng, muốn tính nội năng phải dùng công thức:

$$u = i - pv \quad (1-28)$$

trong đó:

$u$  tính theo kJ;

$i$  tính theo kJ;

$p$  tính theo  $\text{N/m}^2$ ;

$v$  tính theo  $\text{m}^3/\text{kg}$ ;

Để xác định các thông số của chất lỏng chưa sôi và hơi quá nhiệt ta sử dụng bảng hơi quá nhiệt tra theo nhiệt độ và áp suất.

Hơi bão hoà ẩm là hỗn hợp giữa chất lỏng sôi và hơi bão hoà khô. Các thông số của hơi bão hoà ẩm được  $v_x'$ ,  $p_x'$ ,  $i_x'$  được xác định bằng các công thức sau:

$$v_x = v' + x(v'' - v') \quad (1-29a)$$

$$i_x = i' + x(i'' - i') \quad (1-29b)$$

$$s_x = s' + x(s'' - s') \quad (1-29c)$$

trong đó  $x$  là độ khô (lượng hơi bão hoà khô có trong 1 kg hơi bão hoà ẩm). Nếu trong công thức (1-29) khi biết các giá trị  $v_x$ ,  $p_x$ ,  $i_x$  ta có thể tính được độ khô.

Ví dụ:

$$x = \frac{i_x - i''}{i'' - i'} \quad (1-30)$$

#### 1.4.2. Các đồ thị của môi chất

Để tính toán với nước, thuận tiện hơn cả là dùng đồ thị  $i$ - $s$ . đồ thị  $i$ - $s$  của nước được cho trong phần phụ lục.

Với môi chất lạnh  $\text{NH}_3$ ,  $\text{R}_{12}$ ,  $\text{R}^{22}$  . . . , thuận tiện hơn cả là dùng đồ thị  $\lg p$ - $h$ . đồ thị  $\lg p$ - $h$  của một số môi chất lạnh được cho trong phần phụ lục.

### 1.5. các quá trình nhiệt động cơ bản Của khí lý tưởng

#### 1.5.1. Biến đổi nội năng và entanpi của khí lý tưởng

Biến đổi nội năng:

$$\Delta U = U_2 - U_1 = G.C_v.(t_2 - t_1) \quad (1-31)$$

Biến đổi entanpi:

$$\Delta I = I_2 - I_1 = G.C_p.(t_2 - t_1) \quad (1-32)$$

trong đó:

$U$  tính theo kJ;

$I$  tính theo kJ;

$C_v$  và  $C_p$  tính theo kJ/kgK;

$t$  tính theo  $^{\circ}\text{C}$ ;

$G$  tính theo kg;

#### 1.5.2. Quá trình đẳng tích

Quá trình đẳng tích là quá trình nhiệt động xảy ra trong thể tích không đổi  $V = \text{const}$  và số mũ đa biến  $n = \infty$ , nhiệt dung riêng của quá trình  $C_v$ . Trong quá trình này ta có các quan hệ sau:

- Quan hệ giữa nhiệt độ và áp suất:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (1-33)$$

- Công thay đổi thể tích:



$$L = \int_1^2 p dv = 0$$

- Công kỹ thuật:

$$l_{kt12} = -v(p_2 - p_1) \quad (1-34)$$

- Nhiệt của quá trình:

$$Q = G.C_v (t_2 - t_1) \quad (1-35)$$

- Biến thiên entropi:

$$\Delta s = G.C_v \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} \quad (1-36)$$

### 1.5.3. Quá trình đẳng áp

Quá trình đẳng áp là quá trình nhiệt động xảy ra khi áp suất không đổi  $p = \text{const}$  và số mũ đa biến  $n = 0$ , nhiệt dung riêng của quá trình  $C_p$ . Trong quá trình này ta có các quan hệ sau:

- Quan hệ giữa nhiệt độ và thể tích:

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{T_2}{T_1} \quad (1-37)$$

- Công thay đổi thể tích:

$$l_{12} = p(v_2 - v_1) \quad (1-38)$$

- Công kỹ thuật:

$$l_{kt} = 0$$

- Nhiệt của quá trình:

$$Q = G.C_p \cdot (t_2 - t_1) \quad (1-39)$$

- Biến thiên entropi:

$$\Delta s = G.C_p \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} \quad (1-40)$$

### 1.5.4. Quá trình đẳng nhiệt

Quá trình đẳng nhiệt là quá trình nhiệt động xảy ra trong nhiệt độ không đổi  $T = \text{const}$  và số mũ đa biến  $n = 1$ , nhiệt dung riêng của quá trình  $C_T = \infty$ . Trong quá trình này ta có các quan hệ sau:

- Quan hệ giữa áp suất và thể tích:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{v_1}{v_2} \quad (1-41)$$

- Công thay đổi thể tích và công kỹ thuật:

$$l_{kt} = l_{12} = RT \ln \frac{p_1}{p_2} = RT \ln \frac{v_2}{v_1}, \quad (1-42)$$

- Nhiệt của quá trình:

$$Q = L_{12} = Gl_{12} = G.R.T \cdot \ln \frac{p_1}{p_2} \quad (1-43)$$

- Biến thiên entropi:

$$\Delta s = G.R. \ln \frac{p_1}{p_2} \quad (1-44)$$

### 1.5.5. Quá trình đoạn nhiệt

Quá trình đoạn nhiệt là quá trình nhiệt động xảy ra khi không trao đổi nhiệt với môi trường  $q = 0$  và  $dq = 0$ , số mũ đa biến  $n = k$ , entropi của quá trình không đổi  $s = \text{const}$  và nhiệt dung riêng của quá trình  $C = 0$ . Trong quá trình này ta có các quan hệ sau:

- Quan hệ giữa nhiệt độ, áp suất và thể tích:

$$\frac{p_1}{p_2} = \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^k \quad (1-45)$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^{k-1} = \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (1-46)$$

- Công thay đổi thể tích:

$$l_{12} = \frac{p_1 v_1}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \quad (1-47)$$

- Công kỹ thuật:

$$l_{kt12} = kl_{12} = \frac{kRT_1}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \quad (1-48)$$

### 1.5.6. Quá trình đa biến

Quá trình đa biến là quá trình xảy ra khi nhiệt dung riêng của quá trình không đổi  $C = 0$  và được xác định bằng biểu thức sau:

$$C_n = C_v \frac{n-k}{n-1} \quad (1-49)$$

Trong quá trình này ta có các quan hệ sau:

$$\frac{p_1}{p_2} = \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^n \quad (1-50)$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^{n-1} = \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{n-1}{n}} \quad (1-51)$$

- Công thay đổi thể tích:

$$l_{12} = \frac{p_1 v_1}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right] \quad (1-52)$$

- Công kỹ thuật: