

工程热力学

纲要指南及典型习题分析

姚寿广 编著



國防工業出版社

h t t p : / / w w w . n d i p . c n

工 程 热 力 学

纲要指南及典型习题分析

姚寿广 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

工程热力学纲要指南及典型习题分析 / 姚寿广编著.
北京:国防工业出版社,2004(2006.2重印)

ISBN 7-118-03619-6

I. 工... II. 姚... III. 工程热力学-自学参考资料
IV. TK123

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 090115 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 21¼ 386 千字

2004 年 10 月第 1 版 2006 年 2 月北京第 2 次印刷

印数:3001—6000 册 定价:28.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:68428422

发行邮购:68414474

发行传真:68411535

发行业务:68472764

前 言

工程热力学是热能与动力工程、建筑环境与设备工程、轮机工程、过程装备与控制工程、核技术与工程、机械设计制造及自动化等专业的学科技术基础课,在相关专业的教学及人才培养中起着重要的作用。这门课程内容多、概念抽象,既具有较强的理论性和逻辑性,又密切联系工程实际,注重学生运用热力学理论分析实际问题的方法训练。因此因其概念及方法形成方面的特点,使得要熟悉和掌握热力学基本理论和分析方法,尤其是对初学者,存在着一定的困难。学生往往是看书觉得内容易懂,而合上书,又觉得头绪纷乱,不得要领,拿到题目无从下手,不会应用所学到的热力学方法来分析解题,因此《工程热力学》历来是一门教学难度较大的课程。实践证明不演算或接触大量典型的习题,就不可能掌握好这门课程的概念和分析方法。目前随着教改的深入,课堂学时数大幅减少,教师不可能在课堂上讲授很多的习题,教学困难更加凸现。为了提高教学质量,便于同学们有效地自学,作者在长期授课心得的基础上,将自己在教学、辅导中对课程内容,尤其是对学生感到疑难的内容进行分析和整理,并将演习、收集、整理的大量习题解答,精选分类汇集成此书,这样使学生能够在课堂教学的基础上,通过此书作为教辅材料,能尽可能较好、较快地掌握热力学思考、分析和解决实际问题的方法,以提高他们的工程思维分析能力。

本书自 1991 年在校内出版使用以来,受到学生的普遍欢迎和好评,尤其是受到参加硕士研究生入学考试学生的高度评价。经过 5 届学生的使用,于 1995 年对本书第 1 版进行了重新修订。在修订中作者溶入了自己在长期教学中对这门课程形成的、并经实践证明是成功的教改思路和研究成果,针对热力学基本理论,强化了基本概念,尤其是疑难概念的阐述。特别是初学者难以理解的热力学第二定律及熵增概念,本书以系统的熵产概念为内核,对其进行了详尽且深入的剖析。对热力学理论的应用按照“归纳—提炼—抽象—建模—分析—修正”这一现代工程分析思维方法重新安排组织内容,以培养学生运用热力学分析方法去解决实际问题的能力为重点来讲授课程内容,让学生在这种方法的训练中掌握具体的内容。这既避免了以往学生学习这门课程时出现的头绪多、理不清、公式

杂、难记忆的问题,又能使学生在这种经典课程内容的学习中掌握一种面对实际热工问题进行热力学分析的基本方法,达到能力培养的目的。同时对典型习题做了进一步的筛选归纳,从而更为清楚地阐述和表达了工程热力学这门课程的基本概念、基本内容和基本分析方法。经过“八五”的5年学科建设,热工课程获得了江苏省“一类优秀课程”的称号,此书作为建设成果的结晶之一,对热工课程教学质量的进一步提高起到良好的促进作用。1999年又对本书做了第3次修订,对书中内容进行了进一步的提炼,并对部分习题做了修订和补充,使之能更好地达到学生自主学习,提高热工课程教学质量的目的。在前3次校内出版使用的基础上,这次正式出版。

在本书的出版过程中,书稿的打印、绘图、校稿得到了夏莉、郭霆、李庆友老师和我的研究生甘霏斐、彭夷、张鑫、吴迪、刘州等的大力协助,同时国防工业出版社为本书的出版做了大量的工作,在此一并表示衷心的感谢。

本书可供热能与动力工程、建筑环境与设备工程、轮机工程、过程装备与控制工程、核技术与工程等专业本科学生作为教学用书,尤其适合于相关专业学生报考硕士研究生复习备考之用。

由于作者水平有限,书中错误和不妥之处在所难免,欢迎读者不吝指教,以利于本书质量的进一步提高。

作 者

2003年12月

于江苏科技大学

内 容 简 介

本书是工程热力学课程的教学辅导书。全书共分8章。内容包括热力学基本概念与第一定律、理想气体的热力性质与过程、热力学第二定律、热力学一般关系式、实际气体与水蒸气、气体与蒸气的流动、典型动力的热力学分析和湿空气。在体系编排上首先对工程热力学的主要内容提纲挈领地进行阐述,并给出各节要点、主要知识域和主要内容概要,然后精选数百道典型习题,进行分析与讲解,以帮助读者理解和掌握工程热力学的基本原理及分析问题的方法。

本书可供大专院校热能与动力过程、建筑环境与设备工程、轮机工程、过程装备与控制工程、核技术与工程、宇航动力工程与机械设计制造及自动化等专业作为教学基本用书,尤其适合作为相关专业研究生入学考试的复习辅导教材,也可供有关工程技术人员自学参考。

目 录

第一章 热力学基本概念及第一定律	1	第三节 本章典型习题分析	61
第一节 热力学基本概念	1	简答题	61
本节要点	1	分析计算题	66
本节主要知识域	1	第三章 热力学第二定律	97
本节主要内容概要	1	第一节 热力学第二定律	97
第二节 热力学第一定律	8	本节要点	97
本节要点	8	本节主要知识域	97
本节主要知识域	8	本节主要内容概要	97
本节主要内容概要	8	第二节 本章典型习题分析	116
第三节 本章典型习题分析	15	简答题	116
简答题	15	分析计算题	122
分析计算题	19	第四章 热力学一般关系式	163
* 第四节 瞬变流动分析	23	第一节 热力学一般关系式	163
第二章 理想气体的热力性质及热力过程	42	本节要点	163
第一节 理想气体的热力性质	42	本节主要知识域	163
本节要点	42	本节主要内容概要	163
本节主要知识域	42	第二节 本章典型习题分析	175
本节主要内容概要	42	第五章 实际气体与水蒸气	194
第二节 理想气体的热力过程	52	第一节 实际气体的热力性质	194
本节要点	52	本节要点	194
本节主要知识域	52	本节主要知识域	194
本节主要内容概要	52	本节主要内容概要	194

第二节 水蒸气	204	本节要点	270
本节要点	204	本节主要知识域	270
本节主要知识域	204	本节主要内容概要	270
本节主要内容概要	204	第三节 制冷循环分析	288
第三节 本章典型习题分析	207	本节要点	288
简答题	207	本节主要知识域	289
分析计算题	208	本节主要内容概要	289
第六章 气体与蒸汽的流动	226	第四节 本章典型习题分析	295
第一节 气体与蒸汽的流动	226	简答题	295
本节要点	226	分析计算题	300
本节主要知识域	226	第八章 湿空气	312
本节主要内容概要	226	第一节 湿空气	312
第二节 本章典型习题分析	242	本节要点	312
简答题	242	本节主要知识域	312
分析计算题	243	本节主要内容概要	312
第七章 典型动力设备和装置的 热力学分析	264	第二节 本章典型习题分析	315
第一节 压气机热力分析	264	简答题	315
本节要点	264	分析计算题	317
本节主要知识域	264	附录 工程热力学解题的一般 方法和注意点	327
本节主要内容概要	264	主要附号表	330
第二节 动力循环分析	270	参考文献	333

第一章 热力学基本概念及第一定律

第一节 热力学基本概念

本节要点

本节重点主要是介绍工程热力学常用的一些概念、术语和分析方法,主要的基本概念及术语有:热源、热力系统、热力状态、平衡状态、状态参数及特性、状态方程、参数坐标图、热力过程、准静过程、可逆过程及不可逆过程、功与热量、熵与温熵图、热力循环等。通过学习要求较为熟练地掌握以上基本概念的定义和区别,以及热力系统的划分、判断及基本分析方法。

本节主要知识域

1. 热力系统的划分及判断。
2. 平衡状态及稳定状态、均匀状态的区分。
3. 状态参数的特性。
4. 准静过程及可逆过程的区分及联系。
5. 功与热量的定义与异同。

本节主要内容概要

一、热源与工质

1. **工质**:实现热工转换的媒介物质。
2. **热源**的物理抽象:用一温度恒定的高温物体对工质进行加热来代替实际的吸热过程,反之,用一温度恒定的低温物体对工质进行吸热来代替实际的放热过程。

经以上抽象,高温物体称为热源,低温物体称为冷源。

3. **特性**:热(冷)源的热容量无限大。在某些特殊情况下,将注明热容量不是无限大的热源为有限热源。

二、热力系统、边界与外界(环境)

因为热力学是通过对有关物质的状态变化及行为的宏观分析来研究能量转换过程的,所以必须首先选取某固定的物质或某固定空间作为研究对象。

1. **热力系统**:人为地从周围物体中分离出来以作为热力学分析研究对象的一堆物体或空间的某一区域。

2. **外界(环境)**:热力系统以外的其他物体的统称。

3. **边界**:系统与外界的分界面。

需要强调的是,在热力学分析中热力系统的划分极为重要,而热力系统的选取及性质的确定主要取决于分析问题的需要及分析方法上的方便。由于选择好热力系统是进行正确的热力学分析的前提,因此在明确选定好热力系统之前,对力、质量、热、功等任何问题的讨论都是不可能的。

由于热力设备的工作是通过工质的变化而实现能量转换的,且其变化规律直接决定了过程的特点,因此在分析热力设备的工作过程时,常取工质作为热力系统,而把高、低温热源等其他物体取作外界。

4. 几种不同系统的定义。

(1) **开口系统**:系统与外界有物质交换(或称控制容积、控制体)。

(2) **闭口系统**:系统与外界没有物质交换(或称控制质量、定质量系统)。

(3) **简单系统**:系统与外界只有一种形式的功量交换。

(4) **绝热系统**:系统与外界没有热量交换。

(5) **孤立系统**:系统与外界无质量与能量的交换。

(6) **均匀系统**:系统内部各部分化学成分和物理性质都均匀一致,它是由单相组成。

(7) **单元系统**:只包含一种化学成分物质的系统。

(8) **多元系统**:由两种或两种以上物质组成的系统。

5. **工程热力学的主要研究对象**:由可压缩流体组成且与外界只交换容积变化功的简单可压缩系统。

三、热力状态、平衡状态、状态参数及特性

1. **热力状态**:某一瞬间整个系统所呈现的宏观物理状况。

2. **状态参数**:描述热力状态的物理量。

3. **平衡状态**:在没有外界影响的前提下,系统在长时间内不发生任何变化的状态。

判断条件:

(1) 内部不平衡势差为0。

(2) 内部具有确定状态参数(单相且忽略掉重力场的影响时,内部状态均匀

一致)。

(3) 状态不随时间变化。

不符合以上定义的状态通称非平衡状态。

处于平衡状态的热力系统,其状态参数与时间无关,且系统内部任何地方都有确定的参数值。在非平衡状态下,各处的参数不同,系统没有确定的状态参数值。

热力学平衡要求下列几种不平衡势差为0:

(1) 无温差 → 热平衡。

(2) 无压差 → 力平衡。

(3) 无电位差 → 电平衡。

(4) 无化学势差 → 化学平衡。

其中热平衡和力平衡是简单可压缩系统的平衡条件。

经典热力学就是研究平衡态的热力学。

4. 状态参数的特性。

任何物理量,只要它的变化量仅由初态、终态确定,而与变化过程无关,都可作为状态参数。即

$$\int_1^2 dz = z_2 - z_1 \quad \oint dz = 0$$

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

且

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} = \frac{\partial^2 z}{\partial y \partial x} \quad (\text{微分特性})$$

状态参数是状态的单值函数,参数变化量等于初态、终态状态参数的差值,与变化过程无关,也与路径无关。

5. 状态参数的分类。

强度量(参数):与系统的质量无关,具有不可加性质,是物理场量。

例: p 、 T ,当系统强度量不相等时,便会与外界发生能量变换,它在热力过程中起推动作用,故亦称为广义势和广义力。

尺度量(参数):与系统的质量有关,具有可加性质(亦称广延量)。

例: V 、 U 、 S ,在热力过程中,广延量(尺度量)的变化起着类似于力学中位移的作用,故亦称为广义位移。

尺度量(参数)与系统总质量的比值(即比参数)可视为强度量。

四、基本状态参数

1. **压力**:作用在真实或假想表面单位面积上的法向作用力,符号为 p ,单位为 $\text{Pa}(\text{N/m}^2)$ 。

(1) 流体真实压力称绝对压力,符号为 p 。

(2) 大气压力通用符号为 p_b 。

当 $p > p_b$ 时,由仪表测得的压力称表压力,符号为 p_g ,此时有

$$p = p_b + p_g$$

当 $p < p_b$ 时,由仪表测得的压力称真空度,符号为 p_v ,此时有

$$p = p_b - p_v$$

需要强调的是由于 p_b 随时间、地点变化,因此 $p_g(p_v)$ 也随时间地点变化,故此 p_g, p_v 是非状态参数,只有 p 才是状态参数。

2. **温度**:确定系统之间是否处于热平衡的物理量,符号为 T 或 t ,单位为 K 或 $^{\circ}\text{C}$ 。

(1) 热力学定律:当两个系统各自与第 3 个系统处于热平衡时,则这两个系统彼此也处于热平衡。

(2) 热力学温标: K

规定水的三相点温度为 273.16K ,温度间隔为 $1/273.16$ 。

(3) 摄氏温标: $^{\circ}\text{C}$

规定水的三相点温度为 0.01°C (即规定摄氏零度相当于热力学温度的 273.15K),换算式为

$$t(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273.15$$

3. **比体积**:单位质量物质的容积称为“比体积”,为密度的倒数($v = 1/\rho$),符号为 v ,单位为 m^3/kg 。

五、状态公理、状态方程及参数坐标图

1. **状态公理**:纯物质系统的平衡状态完全由 $n+1$ 个独立参数所确定,其中 n 为系统相关准静功形式的数目,1 是考虑系统与外界的热交换。

独立参数的数目等于改变系统能量的措施的形式数目。

简单可压缩系统由于只存在容积变化功一种形式,故独立参数的数目为两个。

2. **状态方程**:在平衡状态下,简单可压缩系统状态参数都可表示为两独立状态参数的函数,其中 p, v, T 3 个基本状态参数之间的函数关系是最基本的关系式,称为状态方程式。即

$$p = p(v, T); v = v(p, T); T = T(p, v)$$

或

$$f(p, v, T) = 0$$

3. **参数坐标图**:由两个独立状态参数组成的坐标图称为参数坐标图。由于平衡状态具有确定的状态参数,因此能够在参数坐标图上用一点表示,而不平衡状态无确定参数,故无法在参数坐标图上标出。

六、热力过程、准静过程与可逆过程

1. **热力过程**:系统从一平衡状态经过一系列中间状态而变化到另一平衡状态所经历的全部过程。

2. **准静过程**:过程中热力系统经历的是一系列平衡状态并在每次状态变化时仅无限小地偏离平衡状态,或系统在变化过程中始终无限接近平衡状态。

引入准静过程的原因如下。

(1) 可抛开外部的复杂因素,仅利用系统内部状态的变化,借助于状态方程及过程热力特征进行热力计算。

(2) 实际问题中大量工程情况近似符合这种理想化的近似抽象。

实际分析时,一个热力过程是否可以近似作为准静过程处理,取决于过程的具体情况,引入弛豫时间后,可以相对地确定一个标准来进行判断。

3. **弛豫时间**:系统的平衡状态破坏后再恢复到新的平衡状态所需要的时间。

若系统在 Δt 时间内使某参数变化了 ΔX ,而这变化达到新的平衡所需弛豫时间 τ 满足 $\tau \ll \Delta t$,则称该过程可以近似为准静过程。

例:活塞行程及气缸长度 L 的数量级为 10^{-1}m ,气体扰动传播一个行程的时间(即系统压强恢复平衡的弛豫时间) $\tau \sim L/v$ 为 $10^{-3}\text{s} \sim 10^{-4}\text{s}$,当活塞以每秒几十次的频率运动时(速率 $< 10\text{m/s}$),每移动一个行程所经历的时间 Δt 约为 10^{-1}s ,显然, $\Delta t \gg \tau$ 满足准静过程的条件。

因此实际分析中相对于活塞与气缸内气体的热力过程可认为活塞是处于“缓慢”移动状态,因此假设气体经历一准静过程是合理的,并具有实际的重要意义。

4. **可逆与不可逆过程**:一个过程进行完毕后,若系统沿原路径反向回到最初状态,此时系统和外界都处于最初状态而没有留下任何变化,这种过程称为“可逆过程”;如果系统与外界有任何一个不能返回到原始状态,则称过程为“不可逆过程”。

准静过程 + 无摩擦等其他耗散效应 = 可逆过程

准静与可逆的区别如下。

(1) 相同点:系统中间过程是一致的平衡状态,具有确定的状态参数,可用参数坐标图表示过程。

(2) 不同点:准静过程主要着眼于系统内部状态的平衡,而可逆过程不仅要

求内部状态的平衡,而且主要着眼于系统与外界相互作用时能量交换过程中内、外部是否存在不平衡势差及耗散效应。

七、功和热量

1. **功**: 热力系统与外界通过边界传递的能量,且其全部效果可表现为举起一重物。

规定: 系统对外界做功为正, 外界对系统做功为负。

对简单可压缩热力系统, 微元过程对外做功为

$$\delta w = p_{\text{外界}} dv$$

微元准静过程中对外做功为

$$\delta w = p dv$$

一般热力分析都是针对不涉及耗散效应的准静过程, 只有这样才能在坐标图上标出功变化情况并进行计算, 而耗散效应一般必须结合外部情况一起考虑解决, 往往不放入系统内部准静过程加以考虑。因此微元准静功的表达式适用于内部准静无摩擦等耗散效应的过程。

功是过程量, 不是状态参数。

2. **热量**: 热力系统与外界之间仅仅由于温度的不同而通过边界传递的能量, 热量不可能把它的全部效果表现为举起一重物。

规定: 系统吸热为正, 系统放热为负。

热量是过程量, 不是状态参数。

功和热量的异同之处如下。

(1) 相同之处: ①同是系统与外界之间通过边界传递的能量; ②系统或外界本身不具有功或热量这样的能量形式。

(2) 不同之处: 功的全部效果可表现为举起重物, 而热量不能。即通俗地讲, 功是高质量的能量, 而热量是低质量的能量。

热量的简单计算公式为

$$\delta q = cdT \quad (c \text{ 为比热容})$$

八、熵与温熵图

1. **势**: 推动能量传递的作用力, 其数值大小直接决定能量传递作用的强度。

2. **状态坐标**: 其变化可作为衡量某种能量传递作用的标志。

热力学引入以上两个状态参数, 把各种能量传递都描述为系统在势参数的作用下其状态坐标发生变化而实现与外界的能量传递。

例:	势	状态坐标
	p	V
	T	S

电势	电荷量
化学势	反应质量

通过以上类比,引入“熵”的概念,这样对无耗散准静过程,系统与外界的热量

$$\delta q = T ds$$

并且有下列判断准则:

$ds > 0$	$\delta q > 0$	系统吸热,熵增加
$ds < 0$	$\delta q < 0$	系统放热,熵减少
$ds = 0$	$\delta q = 0$	系统绝热,熵不变

3. **温熵图**: 类比 $p-v$ 图引入 $T-s$ 图可用来说明系统与外界交换热量的情况,这里要强调说明的是过程必须是无耗散的准静过程,否则不能套用以上的分析。

九、热力循环

1. **热力循环**: 系统从初态出发经历一系列中间状态回到原初始状态所完成的一个封闭的热力过程。

2. **循环净功**: 循环过程中膨胀功与压缩功的代数和,即 $w = \oint \delta w$ 。

3. 若循环沿参数坐标图顺时针方向进行,称为热机循环(亦称正向循环)。

4. 若循环沿参数坐标图反时针方向进行,称为逆向循环,如制冷循环等。

5. 经济性指标计算式为

$$\text{经济性指标} = \frac{\text{得到的收益}}{\text{花费的代价}}$$

(1) **热效率**

$$\eta_t = \frac{W}{Q_1} \quad (\text{对热机})$$

(2) **制冷系数**

$$\epsilon_R = \frac{Q_2}{W} \quad (\text{对制冷机})$$

(3) **供暖系数**

$$\epsilon_P = \frac{Q_1}{W} \quad (\text{对热泵})$$

式中 Q_1 ——正循环吸热量(或逆循环放热量);

Q_2 ——正循环放热量(或逆循环吸热量);

W ——正循环的循环所作净功(或逆循环所耗净功)。

第二节 热力学第一定律

本节要点

本节重点是阐述各种形式的能量方程的应用及方程中各项的物理意义、联系及区别。即着重强调不论什么系统、什么工质、什么过程,第一定律都适用,具有普遍的适应性,关键在于应用对象不同,方程的应用形式不同,为此必须熟练地了解系统总储存能与热力学能、膨胀功、推动功、轴功及技术功的区别及联系,掌握运用热力学方法进行系统能量平衡分析的技能。

本节主要知识域

1. 第一定律的实质。
2. 热力学能及系统总储存能的区分。
3. 开口及闭口系统的能量方程。
4. 技术功、轴功、推动功和膨胀功的联系及区别。
5. 稳定流动能量方程式的应用。

本节主要内容概要

一、热力学第一定律概述

热力学第一定律是能量转换及守恒定律在热现象上的应用,热力学第一定律的能量转换及守恒实质不难理解,问题的复杂性在于应用。能量的转换有赖于物质的状态变化,同时能量有质和形态的差异,因此,(1)要把转移中的能量和储存在物系中的能量分开;(2)转移能又要分为热量和功,储存能也有内部储存能和外部储存能的区别;(3)又由于实际中的能量转移都是瞬态过程,所以又要抽象为与时间无关的稳态稳流过程和与时间相关的但又不涉及时间因素而只关心结果的瞬变流动过程;(4)热能转变为机械能要靠物系体积的改变,其本质是容积变化功,但实际表现出的并不总是容积变化功,所以应用中还要引入其他不同形式的功——技术功、轴功等。

正由于有以上种种原因,同一性质的能量平衡方程将以不同形式不同内容出现在不同的分析问题中,这正是本节需要解决的问题。

二、能量平衡通式及应用

能量守恒定律用平衡通式表示为

$$E_{\text{生产}} = \Delta E_{\text{增}} + E_{\text{out}} - E_{\text{in}} \quad (1-1)$$

能量守恒定律体现了自然界中物质所具有的能量既不能创生,也不能消失,而只能从一种能量形态转换为另一种能量形态,转换中能量的总量在数量上守恒。

针对热力循环,式(1-1)可写为

$$\oint \delta Q = \oint \delta W \quad (1-2)$$

式(1-2)表明热力循环中工质作为一热力系统,它们接受的净热量应该等于对外作的净功。

针对热力过程有

$$dE = \delta Q - \delta W$$

式中, dE 表示某微元过程中,系统吸入的微小热量 δQ 与对外输出微小功量 δW 之间的差值,根据能量守恒可知,它必然储存于系统而转化为系统本身的能量,即 dE 为系统本身总能量的微元增量。

在建立了系统的概念以后,能量可区分为通过边界传递的能量——功(W)和热量(Q)及系统的能量,而系统的能量又可以系统外部参照系表征的参数来表述——**宏观动能**(E_k)、**宏观势能**(E_p)与以物质分子组态及微观运动所确定的能量(U)。在简单可压缩系统热力学分析中,不涉及物质内部结构的变化,此时 U 即为分子热运动所具有的能量——**热力学能**。

这样有

$$E = U + E_k + E_p$$

对于整体无宏观运动的闭口系统,只可能发生热力学状态变化。

$$E = U$$

即

$$dE = dU$$

由此可得热力学第一定律的普遍表达形式为

$$dU = \delta Q - \delta W$$

三、闭口系统能量方程式

下面以比参数表示上面推导出的公式

$$du = \delta q - \delta w$$

或

$$\delta q = du + \delta w$$

即为不考虑宏观运动的热力系统在闭口情况下的热力学第一定律表达式。它说