



工业和信息化部“十二五”规划教材

空气动力学

雷娟棉 吴小胜 吴甲生 编著

AERODYNAMICS

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

V211
3



工业和信息化部“十二五”规划教材

空气动力学

雷娟棉 吴小胜 吴甲生 编著 ●

AERODYNAMICS



内 容 简 介

本书主要介绍空气动力学基础知识、流体运动基本方程、一维定常管流、低速平面位流、膨胀波与激波、边界层理论、高超声速空气动力学基础、飞行器部件空气动力学、制导兵器气动布局与气动特性工程计算、空气动力学实验基础等内容。

本书可作为高等院校飞行器总体设计、飞行力学、飞行器制导与控制、飞行器动力工程、武器系统与发射、航空航天工程等空气动力学相关专业本科生或研究生教材,也可作为航空航天和兵器相关专业工程技术人员的参考书。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

空气动力学 / 雷娟棉, 吴小胜, 吴甲生编著. —北京: 北京理工大学出版社, 2016.5

ISBN 978-7-5682-2300-3

I. ①空… II. ①雷…②吴…③吴… III. ①空气动力学 IV. ①V211

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 088969 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 三河市华骏印务包装有限公司

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 24.25

字 数 / 568 千字

版 次 / 2016 年 5 月第 1 版 2016 年 5 月第 1 次印刷

定 价 / 56.00 元

责任编辑 / 孟雯雯

文案编辑 / 多海鹏

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

前言

目前,国内的空气动力学教材可分为两类:第一类是为综合性大学力学专业本科生编写的教材,此类教材的特点是内容广,篇幅大,难度大,可为力学专业本科生未来从事空气动力学研究奠定坚实的理论基础;第二类是为航空航天院校飞机设计相关专业本科生编写的教材。此类教材的内容以与飞机设计有关的空气动力学基础为主,翼型(低速翼型、跨声速翼型、超声速翼型)和机翼(低速机翼、跨声速机翼、超声速机翼)的空气动力学理论占相当大的篇幅。

空气动力学是飞行器气动设计的理论基础,气动设计是飞行器总体设计的“先行官”和重要组成部分,在飞行器设计中起着至关重要的作用。与力学学科的本科生不同,兵器科学与技术和航空宇航科学与技术学科飞行器设计相关专业方向的本科生除需要掌握空气动力学的基本理论知识外,还需要能将空气动力学的理论知识应用于专业领域,如:能对给定的飞行器进行初步的空气动力特性分析和计算,能进行初步的气动布局分析和气动外形设计等。火箭、导弹等航天飞行器和兵器飞行器设计专业的本科生除需要掌握与气动外形设计有关的外流空气动力学基本理论外,还需要掌握与火箭发动机设计相关的内流基本知识。

本教材旨在为航天和兵器飞行器总体设计、飞行力学、飞行器制导与控制、飞行器动力工程、武器系统与发射、航空航天工程等专业的本科生提供一本实用的空气动力学教科书。本教材的特色体现在以下几个方面:围绕航天和兵器飞行器设计精选空气动力学基础理论内容,以外流空气动力学基本理论为主,兼顾火箭发动机内流的基本理论;在介绍低速不可压缩流动,亚声速、跨声速和超声速可压缩流动空气动力学基本理论的同时,专门用一章介绍高超声速空气动力学基础,为高超声速飞行条件下相关空气动力学问题的分析和研究提供理论基础;在前几章介绍空气动力学基本理论的基础上,介绍了飞行器部件空气动力学基本知识,然后再进一步介绍航天与兵器领域制导武器类飞行器的气动布局 and 气动特性计算基本方法,将空气动力学基本理论与应用相结合;最后用一章介绍空气动力学实验基础知识,将空气动力学基本理论与实验技术相结合。

作者为本科生讲授《流体力学基础》和《空气动力学》课程十余年,为硕士研究生讲授《导弹空气动力学》《飞行器空气动力学》《实验空气

动力学》《飞行器气动布局与气动特性》和《飞行器气动设计》等课程多届。从本科教学需求出发,根据教学大纲要求,在多年教学实践的基础上,作者于2009年编写了《空气动力学基础》内部讲义,目前已经过七年的本科教学使用,本教材就是以该讲义为基础编写的。在本教材获得工业和信息化部“十二五”规划教材立项后,作者根据评审专家意见对教材的内容与结构进行了修改和调整,使其更符合教学需要。另外,作者进行过多项航天和兵器飞行器气动外形设计与气动特性研究工作,在研究中将空气动力学基本原理应用于具体的工程实际,对空气动力学基本理论有了更深入的理解;同时,通过多个工程项目的研究,对空气动力学在航天与兵器飞行器设计中的作用和地位有了更深入的认识。这些都为保证教材质量打下了良好的基础。

由于作者水平有限,书中的缺点和错误在所难免,恳请使用者不吝指正。

苗瑞生教授在生前对书稿进行了仔细的审阅,对教材的内容及章节安排等都提出了许多具体而详尽的修改意见,对提高本教材质量起到了重要作用,仅以此书缅怀敬爱的苗瑞生教授!

编 者

目 录

CONTENTS

绪 论	001
0.1 空气动力学的研究对象、内容及分类	001
0.2 空气动力学的研究方法	002
第1章 基础知识	004
1.1 热力学基础知识	004
1.1.1 热力学的物系	004
1.1.2 气体的状态方程	004
1.1.3 热力学第一定律：内能和焓	006
1.1.4 热力学第二定律：熵	007
1.2 声速和马赫数	009
1.2.1 扰动波的基本知识	009
1.2.2 微弱扰动传播过程与传播速度——声速	009
1.2.3 声速公式	011
1.2.4 马赫数	013
1.3 微弱扰动的传播区——马赫锥	014
1.4 大气结构与标准大气	015
1.4.1 大气结构	015
1.4.2 国际标准大气	017
1.4.3 压强和密度随高度的变化	017
1.5 空气与飞行器的相互作用	019
1.5.1 空气动力和力矩	019
1.5.2 空气动力及力矩系数	019
1.5.3 空气动力坐标系	020

1.5.4 空气动力和力矩的分解	021
习题	022
第2章 流体运动基本方程	024
2.1 系统与控制体	024
2.2 连续方程	025
2.2.1 积分形式的连续方程	025
2.2.2 微分形式的连续方程	026
2.3 动量方程	028
2.3.1 积分形式的动量方程	029
2.3.2 黏性流体中的应力	030
2.3.3 微分形式的动量方程	031
2.4 能量方程	034
2.5 无旋流动的速度位方程及其线化	035
2.5.1 无旋流动和速度位函数	035
2.5.2 无旋流动的速度位方程	036
2.5.3 速度位方程的线化	037
2.5.4 边界条件	039
2.5.5 压力系数的展开式	040
习题	041
第3章 一维定常管流	045
3.1 一维等熵流动和气体动力学函数	045
3.1.1 基本关系式	045
3.1.2 几种参考状态与速度系数	050
3.1.3 气体动力学函数及其应用	054
3.1.4 喷管性能计算	060
3.1.5 火箭推力公式	063
3.2 收缩喷管	068
3.2.1 喷管出口气流参数及临界压强比	068
3.2.2 三种流动状态	069
3.2.3 壅塞状态	072
3.3 拉瓦尔喷管	073
3.3.1 等熵流中的面积比公式	073
3.3.2 反压比对拉瓦尔喷管中流动的影响	074
3.4 等截面摩擦管流	083
3.4.1 等截面摩擦管流的焓熵图	083

3.4.2 摩擦对气流参数的影响	084
3.4.3 摩擦管中气流参数的计算	087
3.4.4 摩擦壅塞	090
3.5 换热管流	093
3.5.1 热量交换对气流参数的影响	093
3.5.2 换热管流的计算	096
3.5.3 加热壅塞	097
3.6 等截面加质管流	098
3.6.1 基本方程	099
3.6.2 侧壁有质量加入对管中流速的影响	100
3.6.3 加质管流的计算公式	102
习题	105
第4章 低速平面位流	109
4.1 不可压位流的速度位方程和流函数	109
4.2 几种简单的二维位流	112
4.2.1 直匀流	112
4.2.2 点源	113
4.2.3 偶极子	115
4.2.4 点涡	117
4.3 简单位流的叠加	118
4.3.1 直匀流加一点源	118
4.3.2 直匀流加偶极子	120
4.4 库塔-儒科夫斯基升力定理	122
4.4.1 绕圆柱的有环量的流动	122
4.4.2 绕圆柱有环量流动的升力	124
习题	126
第5章 膨胀波与激波	128
5.1 膨胀波	128
5.1.1 壁面外折微小角度 $d\theta$	128
5.1.2 普朗特-迈耶尔 (Prandtl-Meyer) 流动	128
5.1.3 膨胀波前后气流参数变化与外折角的关系	129
5.2 微弱压缩波	132
5.3 膨胀波的反射和相交	134
5.3.1 膨胀波在固壁上的反射	134
5.3.2 膨胀波的终止	134

5.3.3 膨胀波的相交	134
5.3.4 膨胀波在自由边界上的反射	135
5.3.5 膨胀波与弱压缩波相交	135
5.4 正激波	136
5.4.1 正激波的形成	136
5.4.2 正激波的传播速度 V_s	138
5.4.3 正激波前后速度系数之间的关系	140
5.4.4 正激波前后气流参数与 Ma_1 的关系	141
5.5 斜激波	144
5.5.1 由方向决定的激波	144
5.5.2 由压强决定的激波	153
5.6 激波的反射与相交	153
5.6.1 激波在固体壁上的反射	153
5.6.2 激波的终止	155
5.6.3 异侧激波的相交	155
5.6.4 同侧激波的相交	156
5.6.5 激波在自由边界上的反射及喷管出口外波系	157
5.7 圆锥激波	157
5.7.1 圆锥绕流的特点	157
5.7.2 气流参数计算	159
习题	160
第6章 黏性边界层理论	164
6.1 黏性边界层概念	164
6.1.1 边界层概念的意义	164
6.1.2 边界层流动图画	164
6.2 边界层的厚度	166
6.2.1 边界层厚度 δ	166
6.2.2 边界层位移厚度 δ^*	166
6.2.3 边界层动量损失厚度 δ^{**}	167
6.3 平面不可压层流边界层微分方程	168
6.3.1 二维平板的边界层微分方程	168
6.3.2 二维微弯曲面的边界层微分方程	170
6.3.3 定常层流边界层解法思路	171
6.4 平板边界层的解	172
6.4.1 布拉休斯 (Blasius) 解	172
6.4.2 卡门动量积分关系式	176

6.5 边界层的分离	180
6.5.1 曲壁边界层及分离现象	180
6.5.2 流动状态对边界层分离的影响	181
6.5.3 边界层分离与压差阻力	181
6.6 可压流边界层	182
6.6.1 温度边界层及气动热	182
6.6.2 高速、高温对边界层的影响	185
6.6.3 可压流中平板的摩擦系数	190
6.6.4 壁面热流密度 q_w 的计算	193
习题	193
 第7章 高超声速空气动力学基础	 196
7.1 高超声速流动特征	196
7.1.1 高超声速绕流图画	196
7.1.2 高超声速流动主要特征	197
7.1.3 高超声速空气动力学的研究内容和研究方法	200
7.2 高超声速飞行器气动特性工程计算方法	201
7.2.1 高超声速无黏流的基本激波关系式	201
7.2.2 牛顿流理论	203
7.2.3 牛顿压力系数公式的李斯修正式	206
7.2.4 布泽曼修正公式	210
7.3 高超声速飞行器气动加热工程计算方法	210
7.3.1 传热的基本形式	210
7.3.2 高超声速气动加热形式	211
7.3.3 壁面状态对气动热影响	213
7.3.4 高温空气平衡组分	213
7.3.5 定常流动壁温计算	214
习题	220
 第8章 飞行器部件空气动力学	 223
8.1 翼型的几何特性及绕流图画	223
8.1.1 翼型的几何特性	223
8.1.2 翼型的绕流图画	224
8.1.3 低速薄翼型理论	228
8.1.4 超声速薄翼型理论	229
8.2 翼面	232
8.2.1 翼面的几何特性	232

8.2.2 翼面的绕流图画	234
8.2.3 升力线理论	238
8.2.4 升力面理论大意	242
8.2.5 压缩性修正	243
8.2.6 超声速前缘矩形平板翼和三角形平板翼的气动特性	245
8.3 细长旋成体的轴对称绕流	246
8.3.1 细长旋成体亚声速轴对称绕流	246
8.3.2 细长旋成体超声速轴对称绕流	248
8.3.3 超声速最小阻力旋成体头部形状	249
8.4 细长旋成体的非轴对称绕流	250
8.4.1 基本方程和边界条件	250
8.4.2 流动分解	251
8.4.3 细长体理论的主要结果	252
8.5 弹翼-弹身干扰	254
8.5.1 弹翼-弹身干扰因子	254
8.5.2 弹翼-弹身干扰机理	255
8.5.3 细长体理论公式	256
8.5.4 弹翼-弹身干扰因子经验公式	259
8.6 前翼-尾翼干扰	260
8.6.1 前翼-尾翼干扰机理	260
8.6.2 细长体理论公式	261
8.7 非圆截面弹身的气动特性	265
8.7.1 概述	265
8.7.2 旋成体大攻角绕流法向力系数和俯仰力矩系数	266
8.7.3 沿纵轴截面积不变的非圆截面弹身气动特性	268
8.7.4 各种横截面形状 $\left(\frac{C_n}{C_{no}}\right)_{SBT}$ 、 $\left(\frac{C_n}{C_{no}}\right)_{Nt}$ 的计算公式	269
习题	275

第9章 导弹气动布局及气动特性工程计算方法

9.1 导弹气动布局	277
9.1.1 翼面沿弹身周向布置形式	277
9.1.2 翼面沿弹身的轴向配置形式与性能特点	278
9.2 导弹气动力工程计算的部件组合法	284
9.2.1 导弹气动力计算的部件组合法	284
9.2.2 导弹部件气动特性分解	285
9.3 旋成体弹身阻力系数和升力系数工程计算方法	285

9.3.1 旋成体弹身的零攻角轴向力系数	285
9.3.2 攻角对弹身轴向力系数的影响	294
9.3.3 旋成体弹身的法向力系数	295
9.3.4 旋成体弹身的升力系数和阻力系数	304
9.4 弹翼的轴向力系数和法向力系数工程计算方法	304
9.4.1 弹翼的零攻角轴向力系数	304
9.4.2 弹翼的线性法向力系数	311
9.4.3 弹翼的非线性法向力系数	313
9.4.4 弹翼的升力系数和阻力系数	316
9.5 弹翼-弹身-尾翼组合体升力系数和阻力系数工程计算方法	317
9.5.1 弹翼-弹身-尾翼组合体的法向力系数	317
9.5.2 弹翼-弹身-尾翼组合体的轴向力系数	318
9.5.3 弹翼-弹身-尾翼组合体的升力系数和阻力系数	320
习题	320
第 10 章 空气动力学实验基础	321
10.1 概述	321
10.1.1 空气动力学实验的基本方法	321
10.1.2 空气动力学实验的任务与内容	322
10.1.3 空气动力学实验的发展概况	322
10.2 空气动力学实验的理论基础	323
10.3 风洞及分类	329
10.3.1 风洞的功能与分类	329
10.3.2 低速风洞	330
10.3.3 亚声速风洞	331
10.3.4 跨声速风洞	332
10.3.5 超声速风洞	332
10.3.6 高超声速风洞	335
10.4 风洞实验模型设计	336
10.5 风洞模型常规实验	337
10.5.1 测力实验	338
10.5.2 压力分布测量	341
10.5.3 铰链力矩实验	342
附 表	347
附表 1 常见流体的密度和重度	347
附表 2 空气和水的属性	347

附表 3	标准大气简表	348
附表 4	亚声速流的流动参数与 Ma 的关系 ($\gamma = 1.4$)	349
附表 5	超声速流的流动参数与 Ma 的关系 ($\gamma = 1.4$)	352
附表 6	气体动力学函数表 ($\gamma = 1.4$) (以 λ 为自变量)	360
附表 7	正激波函数表 ($\gamma = 1.4$)	367
参考文献		374

绪 论

0.1 空气动力学的研究对象、内容及分类

空气动力学是研究空气和其他气体运动规律以及它们与物体相对运动时相互作用规律的科学。

空气动力学是流体力学的一个分支。空气动力学还可以根据飞行马赫数 Ma 、雷诺数 Re 、克努森数 Kn 以及流动是否有外边界、是否与时间有关、研究方法、研究对象等再进行细分。

按马赫数 Ma 划分：

- (1) $Ma \leq 0.3$ ：低速空气动力学；
- (2) $0.3 < Ma \leq 0.8$ ：亚声速空气动力学；
- (3) $0.8 < Ma \leq 1.2$ ：跨声速空气动力学；
- (4) $1.2 < Ma \leq 5.0$ ：超声速空气动力学；
- (5) $Ma > 5.0$ ：高超声速空气动力学。

有时称 $Ma \leq 0.3$ 的流动为不可压缩流动， $Ma > 0.3$ 的流动为可压缩流动。

按雷诺数 Re 划分：

- (1) Re 很大，可以不考虑空气黏性影响的称为理想空气动力学或无黏性空气动力学；
- (2) Re 较小，必须考虑空气黏性影响的称为黏性空气动力学。

按克努森数 Kn 划分：

- (1) $Kn \leq 0.01$ ：连续流动；
- (2) $0.01 < Kn \leq 0.1$ ：滑移流动；
- (3) $0.1 < Kn \leq 10$ ：过渡流动；
- (4) $Kn > 10$ ：自由分子流动。

按是否有外边界划分：

- (1) 没有外边界的为外流空气动力学；
- (2) 有外边界的为内流空气动力学。

按是否与时间有关划分：

- (1) 必须考虑流动与时间关系的为非定常空气动力学；
- (2) 不考虑流动与时间关系的为定常空气动力学。

按研究方法划分：

- (1) 理论空气动力学；

- (2) 计算空气动力学;
- (3) 实验空气动力学。

按研究对象划分:

- (1) 以飞行器为研究对象的为飞行器空气动力学, 又可分为飞机空气动力学、导弹空气动力学、兵器空气动力学等;
 - (2) 以建筑为研究对象的为建筑空气动力学;
 - (3) 以近地面大气为研究对象的为环境空气动力学;
 - (4) 以汽车、火车等车辆为研究对象的为车辆空气动力学。
- 本书以研究制导兵器的空气动力学为主。

0.2 空气动力学的研究方法

空气动力学研究分理论研究、数值模拟计算研究和实验研究三个方面。理论、数值模拟计算和实验研究三者密切结合, 相辅相成。理论研究所依据的一般原理是流动所遵循的基本物理定律: 在动力学方面, 遵循牛顿第二定律; 在能量转换和传递方面, 遵循热力学第一和第二定律; 在介质属性方面, 遵循相应的气体状态方程和黏性、导热性的变化规律等。

1. 数值模拟计算

计算流体动力学 (Computational Fluid Dynamics, 简称 CFD) 是通过计算机数值计算和图像显示, 对包含流体流动和热交换等相关物理现象的系统进行计算和分析。CFD 的基本思想可以归纳为: 把原来在时间域和空间域上连续变化的物理量的场, 如速度场、压力场, 用一系列有限个离散点上的变量值的集合来代替, 通过一定原则和方式建立起关于这些离散点上场变量之间关系的代数方程组, 然后求解代数方程组获得场变量的近似值。CFD 主要包括建立数学模型、构造计算网格、选择数值计算方法和格式以及计算机技术五个方面。描述非连续介质稀薄空气运动的基本方程为玻尔兹曼方程。描述连续介质空气运动的基本方程为纳维尔-斯托克斯 (简称 N-S 方程)。N-S 方程过于复杂, 目前还不能对复杂外形飞行器进行直接的数值模拟。根据不同的实际工程问题, 可以采用 N-S 方程不同的简化形式。这些简化近似方程从简到繁包括: 线性位流方程、非线性位流方程、欧拉方程、黏性边界层方程、黏性薄层近似方程、抛物化 N-S 方程。求解上述方程时, 要根据方程的数学性质选取不同数值方法。有限基本解方法或面元法适用于线性位流方程; 有限元法适用于椭圆型方程。对于非线性空气动力学方程, 广泛采用有限差分方法、有限元法、有限体积法和谱方法。计算机是进行 CFD 数值模拟计算必不可缺的工具, 它不但可以完成数值计算, 还可以进行公式推导、网格生成、计算结果显示和分析。

2. 实验研究

实验研究包括地面模拟实验和飞行试验。风洞因气流易于控制和便于测量等原因, 已成为空气动力学最主要的地面模拟实验设备。在地面模拟实验设备中, 只要满足必要的相似准则就可以模拟真实飞行器的流场, 但是满足全部相似准则的完全模拟是十分困难的, 甚至无法做到, 只能实现保证主要相似准则的局部模拟。风洞实验既能直接为飞行器设计提供气动

特性数据,也能用于空气动力学的基础研究和应用研究,为理论提供流动模型和验证理论,为设计提供新思路和新概念。为了提高风洞的实验能力,需要不断提高风洞性能,例如提高雷诺数、提高前室总温、减少洞壁干扰和支架干扰、降低气流的湍流度等;要发展先进的测试技术,例如采用各种微型探头、非接触测量技术和动态流场测量技术等;要提高数据的质量,提高风洞运转效率;要研究风洞实验和飞行试验的相关性,研究风洞实验结果外推到飞行条件的方法,发展风洞实验和飞行力学虚拟飞行技术。地面模拟实验并不能完全复现真实的飞行条件,因此除地面模拟设备外,还要利用火箭、试验飞机和火箭橇等模型进行自由飞行试验和真实飞行器的飞行试验。

理论分析方法的优点在于所得结果具有普遍性,各种影响因素清晰可见,是指导实验研究和验证新的数值计算方法的理论基础。但是,理论研究方法要求对计算对象进行抽象和简化,才有可能得出理论解,对于非线性情况,只有少数流动才能给出解析结果。

由实验测量方法所得到的实验结果真实可靠,它是理论分析和数值模拟计算方法的基础,其重要性可想而知。然而实验结果受到模型尺寸、流场扰动和测量精度的限制,故有时很难通过实验方法得到较准确的结果。此外,实验还会遇到投入经费较大、人力较多、物力较大及周期较长等困难。

数值模拟计算方法能在计算机上实现特定的计算,好像在计算机上做空气动力学实验一样,不但能得到所需的定量结果,还能在屏幕上显示、看到流场的各种细节,可与风洞实验相辅相成。

第1章

基础知识

1.1 热力学基础知识

热力学是一门用途广泛的学科，在高速空气动力学的问题中，要用到热力学的一些基本知识。这里假设读者已经修习过热力学，仅简单复习高速流中用到的热力学基本概念。

1.1.1 热力学的物系

热力学的研究对象是与周围环境的其他物体划分开的一个任意形态的物质体系（以下简称“物系”），这个体系称为热力学体系。这个体系的尺寸必须是宏观的，其边界可以是壁面，如气缸；也可以只是数学上的界面，如流体微团的界面。这个物系和外界的关系可以是：

- (1) 既无物质交换又无能量交换，称为隔绝体系；
- (2) 无物质交换，但有能量交换，称为封闭体系；
- (3) 有物质交换，也有能量交换，称为开放体系。

经典热力学所处理的都是处于平衡状态下的物系。

1.1.2 气体的状态方程

任何状态下，气体的压强、密度和温度之间均存在着一定的函数关系，即

$$p = p(\rho, T)$$

这个函数关系式称为气体的状态方程。

完全气体是气体分子运动论中所采用的一种模型气体。它的分子是一种完全弹性的微小球粒，内聚力十分小，可以忽略不计，彼此只有在碰撞时才发生作用，微粒的实有总体积和气体所占空间相比可以忽略不计。远离液态的气体基本符合这些假设，通常状况下的空气也符合这些假设，可以看作完全气体。

完全气体的状态方程为

$$\frac{p}{\rho} = RT$$

式中， R 为气体常数，各种气体的气体常数各不相同。空气的气体常数为 $R = 287 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

定容比热容是在物系容积不变的条件下，物系温度升高 1 度所需的热量，表示为