

高等数学教程

李继彬 主编 李国仁 张振良 副主编

科学出版社

高等数学教程

李继彬 主编
李国仁、张振良 副主编

科学出版社

1998

内 容 简 介

本书是根据国家教委对工科高等数学课程的教学基本要求,为适应跨世纪人才培养的需要和教材改革的新形势,在多年教学实践基础上编写而成的。

全书包含线性代数与空间解析几何、一元微积分、多元微积分、级数、常微分方程、数值分析与数学建模等内容。本书内容精炼,重点突出,例题全面,注重对学生数学能力的培养。书中渗入了现代数学的观点,加强了分析、代数和几何的相互联系,从而突出了数学的整体性结构。

本书可作为高等工科院校本科生教材,也可作为有关专业的教师、大学生、工程技术人员与自学成材读者的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

高等数学教程/李继彬主编. —北京:科学出版社,1997

ISBN 7-03-005828-3

I. 高… II. 李… III. 高等数学-教材 IV. 013

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 13622 号

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

北京双建印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1998年5月第一版 开本:787×1092 1/16

1998年5月第一次印刷 印张:41 1/4

印数:1-7 400 字数:962 000

定价:54.00元

序

高等数学作为高等工科院校的一门重要的基础课，不仅应向学生传授必需的数学基础知识，而且还应加强数学素质的培养，让学生通过知识载体，学习从量的侧面对事物进行洞察、抽象及研究的思想和方法；培养必要的思维逻辑性和严密性；提高应用数学的意识、兴趣和能力。为学生今后根据工作需要进一步学习和应用现代数学的知识奠定基础，提供可能性。

李继彬、李国仁、张振良教授等编写的《高等数学教程》一书，从上述基本观点出发，根据国家教委高等学校工科数学课程教学指导委员会《关于工科数学系列课程教学改革的建议》精神，结合作者们多年的教学经验，就渗入现代数学观点，促使分析、代数和几何的相互联系，加强数学建模和数值计算等方面进行了有益的探索和改革，力图使本书既能适当反映科学技术现代化的要求又能切合当前教学的实际。这是值得倡导的一种改革方向。

教学内容和课程体系的改革是教学改革的重点与难点，应当鼓励不同层次、不同模式的改革试点；鼓励不同要求、不同风格的教材百花齐放。相信本书的出版将以其具有的特色为工科数学课程教材改革的百花园增添一支鲜花，对提高工科数学教学质量与学生数学素质的培养产生积极作用。

马知恩

1996年11月于西安交大

前 言

本书参照国家教委高等学校工科数学课程教学指导委员会 1995 年 5 月《关于工科数学系列课程教学改革的建议》，适应跨世纪人才培养和教学改革的需要，在昆明理工大学数学教研室高等数学课程多年的教学经验和教材建设的基础上编写而成。

本书内容包含线性代数与空间解析几何、一元微积分、多元微积分、级数、常微分方程、数值分析与数学建模等，各章节后均配有适量习题和综合自测题。

本书的结构与某些讲述方法有别于以往的高等数学通用教材。首先，把分析、代数与几何揉合在一起进行讲授；其次，在计算机日益普及的信息时代，增加了数值方法和数学建模思想的基本内容；第三，在第一章中引入了反映现代数学的某些基本知识 with 观点；第四，对常系数非齐次微分方程求特解，用算子方法代替待定系数法等等。这些都是教材改革的一些新尝试。

本书可作为高等工科院校本科的教材，也可作为广大工程技术人员与自学成才读者的自学用书。

讲授本书的总学时范围为 220—250 学时。

本书第一篇由张振良、李庶民编写，第二篇由李国仁、冯彬编写，第三篇由彭琼英、胡晓华编写，第四篇与第五篇分别由季福弟、李继彬编写。初稿完成后，由李国仁、张振良、李继彬对全书进行了系统的统稿、定稿和加工工作。

本书的编写出版承蒙国家教委高等学校工科数学课程教学指导委员会主任、西安交通大学马知恩教授的热忱鼓励，并为本书作序，得到昆明理工大学校领导、教务处和教材科的大力支持，科学出版社吕虹同志为本书出版付出了辛勤劳动，香港伍集成文化教育基金会给予部分资助，在此一并表示衷心感谢。

目 录

第一篇 空间解析几何与线性代数

第一章 集合、关系、映射与运算	1
§ 1.1 集合的概念	1
§ 1.2 笛卡尔积和关系	4
§ 1.3 映射的概念	8
§ 1.4 运算及其性质	10
第二章 行列式	15
§ 2.1 行列式的定义与性质	15
§ 2.2 行列式的计算	22
§ 2.3 克莱姆法则	28
第三章 矩阵	32
§ 3.1 矩阵的概念及运算	32
§ 3.2 逆矩阵	39
§ 3.3 矩阵的初等变换和初等矩阵	44
§ 3.4 分块矩阵	50
第四章 三维向量与空间解析几何	58
§ 4.1 向量的几何表示和运算	58
§ 4.2 空间直角坐标系与向量的坐标表示	63
§ 4.3 向量的数量积、向量积与混合积	70
§ 4.4 平面及其方程	76
§ 4.5 空间直线及其方程	81
§ 4.6 曲面及其方程	88
§ 4.7 二次曲面	94
§ 4.8 空间曲线及其方程	99
第五章 n 维向量与线性方程组	103
§ 5.1 线性方程组的高斯消元法	103
§ 5.2 n 维向量及其线性相关性	105
§ 5.3 向量组的秩与矩阵的秩	110
§ 5.4 齐次线性方程组解的结构	117
§ 5.5 非齐次线性方程组的解	120
§ 5.6 主元高斯消去法	124
第六章 矩阵的特征值、特征向量与二次型	127
§ 6.1 矩阵的特征值与特征向量, 相似矩阵	127
§ 6.2 向量的内积, 正交矩阵	131

§ 6.3 实对称矩阵的对角化	135
§ 6.4 二次型及其标准形	139
§ 6.5 正定二次型	144
第七章 线性空间与欧氏空间	148
§ 7.1 线性空间	148
§ 7.2 线性变换及其矩阵表示	153
§ 7.3 欧氏空间	163
单元自测题	166

第二篇 一元微积分

第八章 函数、极限与连续	170
§ 8.1 函数概念	170
§ 8.2 反函数、复合函数及初等函数	176
§ 8.3 极限概念	184
§ 8.4 无穷小与无穷大	194
§ 8.5 极限的四则运算	196
§ 8.6 夹逼准则及两个重要极限	201
§ 8.7 无穷小的比较	205
§ 8.8 函数的连续性	208
第九章 导数与微分	217
§ 9.1 导数概念	217
§ 9.2 求导法则	222
§ 9.3 隐函数和由参数方程确定的函数的导数	231
§ 9.4 高阶导数	236
§ 9.5 函数的微分	239
§ 9.6 微分的应用	244
第十章 微分中值定理与导数的应用	247
§ 10.1 微分中值定理	247
§ 10.2 罗必达法则	252
§ 10.3 泰勒公式	257
§ 10.4 函数的增减性与极值	261
§ 10.5 曲线的凹凸性及拐点, 函数图形的描绘	269
§ 10.6 弧微分. 曲率	276
第十一章 不定积分	281
§ 11.1 不定积分的概念和性质	281
§ 11.2 换元积分法	286
§ 11.3 分部积分法	296
§ 11.4 几种特殊类型函数的积分	301
§ 11.5 积分表的使用	309
第十二章 定积分及其应用	312
§ 12.1 定积分的概念	312

§ 12.2	定积分的性质	316
§ 12.3	微积分基本定理	319
§ 12.4	定积分的换元法与分部积分法	324
§ 12.5	定积分的几何应用	331
§ 12.6	定积分在物理上的应用	340
§ 12.7	平均值	343
§ 12.8	广义积分	346
单元自测题		350

第三篇 多元微积分

第十三章	多元函数微分学	354
§ 13.1	多元函数的基本概念	354
§ 13.2	二元函数的极限与连续性	358
§ 13.3	偏导数	361
§ 13.4	全微分及其应用	366
§ 13.5	多元复合函数的求导法则	371
§ 13.6	隐函数的求导公式	376
§ 13.7	微分法在几何上的应用	380
§ 13.8	方向导数与梯度	384
§ 13.9	多元函数的极值	388
§ 13.10	二元函数的泰勒公式	394
第十四章	重积分	398
§ 14.1	二重积分的概念与性质	398
§ 14.2	二重积分在直角坐标系中的算法	402
§ 14.3	二重积分在极坐标系中的算法	409
§ 14.4	二重积分的应用	414
§ 14.5	三重积分的概念及其在直角坐标系中的算法	419
§ 14.6	三重积分在柱面坐标系、球面坐标系中的算法	423
§ 14.7	重积分的换元法	428
第十五章	曲线积分与曲面积分	435
§ 15.1	对弧长的曲线积分	435
§ 15.2	对坐标的曲线积分	439
§ 15.3	格林公式及其应用	444
§ 15.4	对面积的曲面积分	453
§ 15.5	对坐标的曲面积分	456
§ 15.6	高斯公式和斯托克斯公式	463
§ 15.7	场论初步	471
单元自测题		476

第四篇 无穷级数与常微分方程

第十六章	无穷级数	479
-------------	-------------	-----

§ 16.1	常数项级数的概念与性质	479
§ 16.2	正项级数及其审敛法	484
§ 16.3	任意项级数及其审敛法	491
§ 16.4	函数项级数与幂级数	495
§ 16.5	函数展开成幂级数	504
§ 16.6	幂级数的应用	511
§ 16.7	函数项级数的一致收敛性	514
§ 16.8	傅里叶级数	522
单元自测题		535
第十七章 常微分方程		537
§ 17.1	微分方程的基本概念	537
§ 17.2	一阶微分方程	541
§ 17.3	可降阶的高阶微分方程	552
§ 17.4	高阶线性微分方程	556
§ 17.5	常系数线性微分方程	562
§ 17.6	常系数线性微分方程组	572
§ 17.7	微分方程的幂级数解法	575
单元自测题		578

第五篇 数值分析与数学建模初步

第十八章 数学分析中的数值方法		579
§ 18.1	误差与数的近似表示	579
§ 18.2	方程的近似解	580
§ 18.3	定积分的近似计算	583
§ 18.4	常微分方程的近似积分法	586
§ 18.5	最小二乘法	589
第十九章 数学建模		592
§ 19.1	数学模型概念	592
§ 19.2	人口增长的数学模型	593
§ 19.3	传染病传播的数学模型	595
§ 19.4	市场平衡问题	597
附 录	积分表	600
	习题答案	608
参考文献		649

第一篇 空间解析几何与线性代数

第一章 集合、关系、映射与运算

德国出版的《数学小百科全书》(秦曾复等译,上海科学技术出版社,1985)中,谈到集合论时曾说过下面一段话:“集合论是现代数学大厦的基石.所有数学概念的精确定义都是建立在集合论基础上的,而且数学演绎方法具有逻辑论证与集合论证相结合的特征.简言之,集合论的语言是全世界数学家表达和理解的语言.因此,谁想在高等数学和它的实际应用中取得进展,他就必须熟悉集合论的基本概念和结果,理解表达它们的语言”.我们将在本章简单地介绍集合论中常用的一些基本概念,这些基本概念包括集合、笛卡尔积、关系(包括等价关系,偏序关系)以及映射和运算.

§ 1.1 集合的概念

集合是数学的一个最基本的概念,不能用比它更简单的概念来定义它,只能作描述性的解释.集合论的创始人康托尔(G. Cantor)是这样描述的:“集合是我们的感觉或思维所完全确定的某些对象汇总成一个整体的结果;这些对象称为该集合的元素.”通常,我们用大写字母 A, B, C, \dots 表示集合,用小写字母 a, b, c, \dots 表示元素.

如果 a 是集合 A 的元素,就称 a 属于 A ,记作 $a \in A$. 如果 a 不是集合 A 的元素,就称 a 不属于 A ,记作 $a \notin A$.

通常,自然数、整数、有理数、实数、复数组成的集合分别记作 N, Z, Q, R, C .

含有有限个元素的集合叫做有限集,含有无穷多个元素的集合叫做无限集,不含任何元素的集合叫做空集,记作 \emptyset .

集合的表述法通常有两种,一种是穷举法,即列出集合的所有元素,元素之间用逗号隔开,并用花括号括起来.例如,26个英文字母集合可以表示为

$$A = \{a, b, c, \dots, y, z\}.$$

另一种是描述法,即用集合中所有元素所具有的特性来表示集合,记作

$$A = \{x | P(x)\},$$

其中在“|”的左边表示 x 是 A 的元素,“|”的右边 $P(x)$ 表示元素 x 具有性质 P ,花括号表示把所有具有性质 P 的元素汇集成一个集合 A . 例如全体正偶数集合可以用描述法表示为

$$B = \{x | x = 2n, n \in N\}.$$

又如平面直角坐标系中,直线 $2x - y = 1$ 上所有坐标为 (x, y) 的点组成的集合可以表示为

$$C = \{(x, y) | 2x - y = 1, x, y \in R\}.$$

许多集合可以用两种方法表示,如集合 $D = \{1, -1\}$,又可以表示为 $D = \{x | x \in R, x^2$

$-1=0$).

注记 1 集合中的元素是彼此不同的,重复元素只能算一个,如 $\{1,1,2,3\}=\{1,2,3\}$.

注记 2 集合中的元素是无序的,如 $\{1,2,3\}=\{3,1,2\}$.

定义 1.1.1 设 A, B 是集合,如果 B 中的每个元素都是 A 中的元素,则称 B 是 A 的子集合,简称子集.此时也称 B 被 A 包含,或 A 包含 B ,记作 $B \subseteq A$.

如果 A 不包含 B ,记作 $B \not\subseteq A$.

由上述定义可知, $B \subseteq A$ 等价于:对任意 x ,若 $x \in B$ 则必有 $x \in A$.

显然,对任意集合 A ,均有 $\emptyset \subseteq A, A \subseteq A$.

定义 1.1.2 设 A, B 是集合,如果 $A \subseteq B$ 且 $B \subseteq A$,则称集合 A 与集合 B 相等,记作 $A=B$.

如果集合 A 与集合 B 不相等,记作 $A \neq B$.

由这一定义可见, $A=B$ 等价于:对任意 $x, x \in A$ 必有 $x \in B$,且对任意 $y, y \in B$ 必有 $y \in A$.

定义 1.1.3 设 A, B 是集合,如果 $B \subseteq A$ 且 $B \neq A$,则称 B 是 A 的真子集,记作 $B \subset A$.

于是 $B \subset A$ 可以表述为:对任意 $x, x \in B$ 必有 $x \in A$,且存在 y ,使 $y \in A$ 但 $y \notin B$.

例如 $N \subset Z \subset Q \subset R \subset C$.

定义 1.1.4 设 A 是非空集合, A 的所有子集作为元素组成的集合称为 A 的幂集,记作 $P(A)$ 或 2^A .

因此, $P(A)$ 可以表示为

$$P(A) = \{x | x \subseteq A\},$$

即 $x \in P(A)$ 等价于 $x \subseteq A$.

例如 $A = \{0, 1, 2\}$, 则

$$P(A) = \{\emptyset, \{0\}, \{1\}, \{2\}, \{0, 1\}, \{0, 2\}, \{1, 2\}, A\}.$$

不难看出,若 A 有 n 个元素,则 $P(A)$ 有 2^n 个元素.

人们总是局限于在确定的范围内研究问题,这种确定的范围通常称为空间.换言之,空间就是我们讨论的所有事物构成的集合,又叫做全集,记为 E .全集是相对的,不同的问题有不同的全集.例如,我们在有理数范围内研究有理数的大小时,把有理数集取为全集;而在实数范围内研究实数的大小时,把实数取作全集,也就是通常说的实数空间,在几何上对应于实轴上的全体点集.如果我们在平面上研究直线的相互关系,则把平面上所有点的集合取作全集,又叫实平面空间.

定义 1.1.5 设 E 是全集, A, B 是 E 的子集,集合

$$A \cup B = \{x | x \in A \text{ 或 } x \in B\},$$

$$A \cap B = \{x | x \in A \text{ 且 } x \in B\},$$

$$A - B = \{x | x \in A \text{ 但 } x \notin B\},$$

$$\bar{A} = E - A = \{x | x \notin A\}$$

分别称为集合 A 与 B 的并集,交集,差集,以及集合 A 的补集或余集.

两个集合的并集,交集,差集和一个集合的补集分别可以用图 1.1 中的阴影部分来表

示.

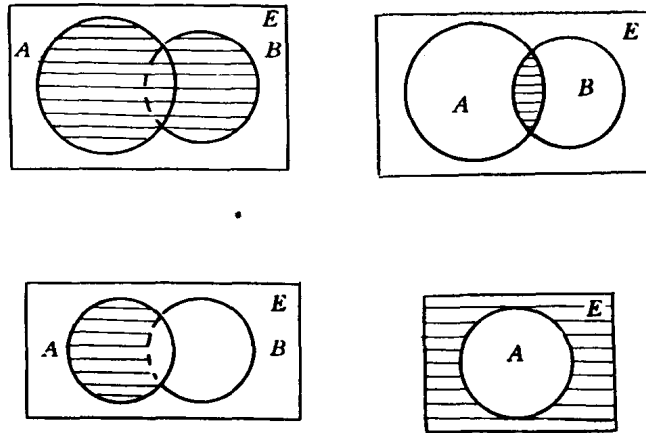


图 1.1

例 1.1.1 设全集是全体实数集合 R , 又设集合 $A = \{x | x > 0\}$, $B = \{x | -1 < x < 2\}$, 则

$$\begin{aligned} A \cup B &= \{x | x > -1\}, \\ A \cap B &= \{x | 0 < x < 2\}, \\ A - B &= \{x | x \geq 2\}, \\ \bar{A} &= \{x | x \leq 0\}. \end{aligned}$$

两个集合的交与并可以推广到 n 个集合或无穷多个集合的交和并, 分别记为

$$\begin{aligned} \bigcap_{i=1}^n A_i &= A_1 \cap A_2 \cap \cdots \cap A_n = \{x | \text{对任意 } A_i, \text{ 有 } x \in A_i, 1 \leq i \leq n\}, \\ \bigcup_{i=1}^n A_i &= A_1 \cup A_2 \cup \cdots \cup A_n = \{x | \text{存在 } A_i, \text{ 使 } x \in A_i, 1 \leq i \leq n\}, \\ \bigcap_{i=1}^{\infty} A_i &= A_1 \cap A_2 \cap \cdots = \{x | \text{对任意 } A_i, \text{ 有 } x \in A_i, i \geq 1\}, \\ \bigcup_{i=1}^{\infty} A_i &= A_1 \cup A_2 \cup \cdots = \{x | \text{存在 } A_i, \text{ 使 } x \in A_i, i \geq 1\}. \end{aligned}$$

习题 1.1

- 设 a 是集合 A 中的一个元素. 下列各式中哪些是正确的, 哪些是错误的?
 - $a \in A$;
 - $a \in \{a\}$;
 - $a \subseteq A$;
 - $a \subseteq \{a\}$;
 - $\{a\} \subseteq A$;
 - $\{a\} \in A$.
- 下列各式中哪些是正确的, 哪些是错误的?
 - $\emptyset \in \{\emptyset\}$;
 - $\emptyset \subseteq \{\emptyset\}$;
 - $\emptyset \in \{\{\emptyset\}\}$;
 - $\emptyset \subseteq \{\{\emptyset\}\}$;
 - $\{\emptyset\} \in \{\{\emptyset\}\}$;
 - $\{\emptyset\} \subseteq \{\{\emptyset\}\}$.
- 设全集 $E = \{a, b, c, d, e, f\}$, $A = \{a, d\}$, $B = \{a, b, e\}$, $C = \{b, d\}$. 试求下列集合:
 - $A \cap \bar{B}$;
 - $(A \cap B) \cup \bar{C}$;
 - $\overline{A \cap B}$;
 - $P(A) \cap P(B)$;
 - $P(A) - P(B)$.
- 求下列集合的幂集:
 - $\{a, b, c\}$;
 - $\{a, \{b, c\}\}$;
 - $\{\emptyset\}$;
 - $\{\emptyset, \{\emptyset\}\}$.

5. 化简下列集合的表达式:

$$1) ((A \cup B) \cap B) - (A \cup B); \quad 2) ((A \cup B \cup C) - (B \cup C)) \cup A;$$

$$3) (B - (A \cap C)) \cup (A \cap B \cap C); \quad 4) (A \cap B) - (C - (A \cup B)).$$

6. 设 A, B, C 是集合. 证明:

$$1) A - B = A - (A \cap B) = (A \cup B) - B; \quad 2) A \cap (B - C) = (A \cap B) - (A \cap C);$$

$$3) (A - B) - C = A - (B \cup C); \quad 4) A - (B - C) = (A - B) \cup (A \cap C).$$

7. 设 A, B 是集合. 证明:

$$1) P(A) \cap P(B) = P(A \cap B); \quad 2) P(A) \cup P(B) \subseteq P(A \cup B).$$

§ 1.2 笛卡尔积和关系

在平面解析几何中,我们引入了直角坐标系,使平面上的任何一个点对应于一对有顺序的实数偶 (x, y) ,其中 x 为第一坐标(横坐标), y 为第二坐标(纵坐标).把这种思想推广到一般集合上,就得到下面的定义.

定义 1.2.1 设 A, B 是两个非空集合,把集合

$$\{(a, b) | a \in A, b \in B\}$$

称为 A 与 B 的笛卡尔积,记作 $A \times B$.

特别,当 $A=B$ 时, $A \times B$ 记作 A^2 .

于是,平面直角坐标系中坐标平面就是 R 和 R 的笛卡尔积 R^2 ,通常称为二维几何空间.而实数轴称为一维几何空间.

一般地,设 A_1, A_2, \dots, A_n 是 n 个非空集合,由 n 个有序组 (x_1, x_2, \dots, x_n) 组成的集合

$$\{(x_1, x_2, \dots, x_n) | x_i \in A_i, 1 \leq i \leq n\}$$

称为 A_1, A_2, \dots, A_n 的 n 维笛卡尔积,记为 $A_1 \times A_2 \times \dots \times A_n$.

本书第四章中将要引入的空间直角坐标系就是实数集 R 的三维笛卡尔积 R^3 ,称为三维几何空间.

例 1.2.1 给定集合 $A = \{1, 2\}, B = \{a, b, c\}, C = \{x, y\}$, 则

$$A \times B = \{(1, a), (1, b), (1, c), (2, a), (2, b), (2, c)\},$$

$$B \times A = \{(a, 1), (a, 2), (b, 1), (b, 2), (c, 1), (c, 2)\},$$

$$A^2 = \{(1, 1), (1, 2), (2, 1), (2, 2)\},$$

$$A \times B \times C = \{(1, a, x), (1, b, x), (1, c, x), (2, a, x), (2, b, x), (2, c, x),$$

$$(1, a, y), (1, b, y), (1, c, y), (2, a, y), (2, b, y), (2, c, y)\}.$$

一般 $A \times B \neq B \times A$.

不难看出,若 A 有 n 个元素, B 有 m 个元素.则 $A \times B$ 有 $n \times m$ 个元素.同理,若 C 有 k 个元素,则 $A \times B \times C$ 有 $n \times m \times k$ 个元素.

由此可见,集合 A 与 B 的笛卡尔积实际上是 A 的所有元素与 B 的所有元素之间的有序搭配所组成的序偶(A 的元素在前, B 的元素在后)的全体构成的集合.

现在我们考虑集合 A 与 B 之间的关系.给定 A 与 B 间的某个关系,满足这种关系的 A 中元素与 B 中元素也组成一个序偶,这些序偶组成的集合是 A 与 B 的笛卡尔积的子集.

定义 1.2.2 设 A, B 是两个非空集合,则 $A \times B$ 的任意子集都称为 A 与 B 的一个二

元关系. 通常, 我们用 R, S, Q 等字母表示二元关系. 若 x 和 y 有关系 R , 记作 $(x, y) \in R$ 或者 xRy .

特别, 若 $A=B$ 时, 称为 A 上的关系.

定义 1.2.3 设 R 是 A 到 B 的关系, 记

$$\text{dom}R = \{x | x \in A, \text{存在 } y \in B, \text{使得 } (x, y) \in R\},$$

$$\text{ran}R = \{y | y \in B, \text{存在 } x \in A, \text{使 } (x, y) \in R\},$$

则 $\text{dom}R$ 和 $\text{ran}R$ 分别称为关系 R 的定义域和值域.

例 1.2.2 设 $A = \{2, 3, 4\}, B = \{2, 4, 6, 7\}$, 求 $R = \{(x, y) | x \in A, y \in B, x | y\}$ 和 $\text{dom}R, \text{ran}R$, 其中 $x | y$ 表示 x 能整除 y , 而 R 表示 A 中元素能整除 B 中元素的关系.

解

$$R = \{(2, 2), (4, 4), (2, 4), (2, 6), (3, 6)\},$$

$$\text{dom}R = \{2, 3, 4\}, \text{ran}R = \{2, 4, 6\}.$$

例 1.2.3 设 S 和 Q 分别表示实数集 R 中的相等关系和大于关系, 则

$$S = \{(x, y) | x, y \in R, x = y\},$$

$$Q = \{(x, y) | x, y \in R, x > y\}.$$

所以, S 是实平面 R^2 中的直线 $x - y = 0$, 即第一、第三象限的对角线, 而 Q 是对角线 $x - y = 0$ 的右下方半平面. 它们都是 R^2 的子集.

一般地, n 个非空集合 A_1, A_2, \dots, A_n 的笛卡尔积 $A_1 \times A_2 \times \dots \times A_n$ 的任意子集称为这 n 个集合的 n 元关系. 若 $A_1 = A_2 = \dots = A_n = A$, 称为 A 上的 n 元关系.

例 1.2.4 设 $A = \{1, 2, 3, 4, 5\}$, 求 A 中的三元关系 $R = \{(x, y, z) | x, y, z \in A, x < y < z\}$. 换言之关系 R 表示 x 小于 y 且 y 小于 z 的三元关系, 则

$$R = \{(1, 2, 3), (1, 2, 4), (1, 2, 5), (1, 3, 4), (1, 3, 5),$$

$$(1, 4, 5), (2, 3, 4), (2, 3, 5), (2, 4, 5), (3, 4, 5)\}.$$

下面我们主要讨论某个集合中的二元关系, 并给出两种最重要的关系: 等价关系和偏序关系. 它们具有良好的性质和广泛的应用.

定义 1.2.4 设 R 是非空集合 A 上的一个二元关系,

- 1) 若对任意 $a \in A$, 均有 $(a, a) \in R$, 则称 R 是自反的;
- 2) 若对任意 $a, b \in A$, 如果 $(a, b) \in R$, 就有 $(b, a) \in R$, 则称 R 是对称的;
- 3) 若对任意 $a, b \in A$, 如果能由 $(a, b) \in R$ 和 $(b, a) \in R$ 推出 $a = b$, 则称 R 是反对称的;
- 4) 若对任意 $a, b, c \in A$, 如果 $(a, b) \in R$ 和 $(b, c) \in R$, 就有 $(a, c) \in R$, 则称 R 是传递的.

例如, 设实数集 R 上的关系 S 是小于关系 " $<$ ", 即 $(a, b) \in S$ 表示 $a < b$, 则 S 是传递的; 若 S 是小于等于关系 " \leq ", 则 S 是自反的, 反对称的和传递的; 若 S 是相等关系, 则 S 是自反的, 对称的和传递的.

定义 1.2.5 设 R 是非空集合 A 上的一个关系, 若 R 具有自反性, 对称性和传递性, 则称 R 是 A 上的一个等价关系.

等价关系的例子很多, 如实数的相等关系, 集合的相等关系, 平面直线的平行关系, 几何图形的相似关系和全等关系等等.

例 1.2.5 设 $A = \{1, 2, \dots, 8\}$, 定义 A 上的关系

$$R = \{(x, y) | x, y \in A, x \equiv y \pmod{3}\},$$

其中 $x \equiv y \pmod{3}$ 称为 x 与 y 模 3 相等, 表示 x 除以 3 的余数与 y 除以 3 的余数相等, 即 $x-y$ 可以被 3 整除. 容易验证 R 是 A 上的等价关系. 记 $A_0 = \{3, 6\}$, $A_1 = \{1, 4, 7\}$, $A_2 = \{2, 5, 8\}$, 则 A_0, A_1, A_2 分别表示 x 除以 3 后余数为 0, 1 和 2 的元素组成的集合, 不难看出, 每个 $A_i (0 \leq i \leq 2)$ 中的任意两个元素都相互等价, 不同 A_i 中的两个元素都不等价, 而且 $\bigcup_{i=0}^2 A_i = A, A_i \cap A_j = \emptyset (i \neq j)$. 由此, 我们给出下面的定义和结果.

定义 1.2.6 设 R 是非空集合 A 上的一个等价关系, 对任意 $a, b \in A$, 若 $(a, b) \in R$, 则称 a 和 b 关于 R 等价, 记

$$[a] = \{x \mid (x, a) \in R, x \in A\},$$

称 $[a]$ 是元素 a 关于 R 的等价类, a 称为 $[a]$ 的代表元.

定理 1.2.1 设 R 是非空集合 A 上的等价关系, 则

- 1) 对任意 $x \in A, [x] \neq \emptyset$;
- 2) 对任意 $x, y \in A$, 若 $(x, y) \notin R$, 则 $[x] \cap [y] = \emptyset$;
- 3) $\bigcup_{x \in A} [x] = A$.

本书不准备证明这个定理, 只解释一下它的含义: 结论 1) 表示 A 中的任意元素都有等价类, 且等价类不空; 结论 2) 表示 A 中任意互不等价的两个元素, 它们的等价类不相交; 结论 3) 表示所有等价类的并正好等于集合 A 本身.

由此可见, 集合中的等价关系的重要性, 不仅在于它可以把集合中的每个元素按等价定义无遗漏地分在某一类中, 而且不同的等价类互不相交. 这样, 按等价类就可以构成对集合的一个划分.

定义 1.2.7 设 R 是非空集合 A 中的等价关系, 把等价类作为元素组成的集合构成 A 的一个划分, 称为 A 关于 R 的商集, 记作 A/R , 即

$$A/R = \{[a] \mid a \in A\}.$$

如例 1.2.5 中的商集 $A/R = \{A_0, A_1, A_2\} = \{[0], [1], [2]\}$.

定义 1.2.8 设 R 是非空集合 A 中的一个关系, 若 R 具有自反性, 反对称性和传递性, 则称 R 是 A 中的一个偏序关系. 记作“ \leq ”, 并称 (A, \leq) 是一个偏序集. 即 $(x, y) \in R$ 记作 $x \leq y$.

实数集上的小于等于关系“ \leq ”; 集合 A 的幂集 $P(A)$ 中的集合的包含关系“ \subseteq ”等都是偏序关系.

例 1.2.6 设 Z^* 是非零整数集, 定义 Z^* 中的关系

$$R = \{(x, y) \mid (x, y) \in R, x \text{ 整除 } y\}.$$

不难验证 R 是 Z^* 上的偏序关系.

定义 1.2.9 设 (A, \leq) 是一个偏序集, 对任意 $a, b \in A$, 如果 $a \leq b$ 或 $b \leq a$ 中至少有一个成立, 则称 (A, \leq) 是一个全序集或链, 而称 \leq 是 A 上的一个全序或线性序.

例如, 实数集中的小于等于关系“ \leq ”是全序关系; 集合 A 的幂集 $P(A)$ 中的包含关系“ \subseteq ”则不是全序关系. 同样, 非零整数集中的整除关系也不是全序关系.

定义 1.2.10 设 (A, \leq) 是偏序集, 如果 A 中存在元素 b , 使得对任何 $a \in A$ 都有 $b \leq a$, 则称 b 是 (A, \leq) 的最小元. 如果在 A 中存在元素 c , 对于任何的 $a \in A$ 都有 $a \leq c$, 则称 c 是 (A, \leq) 的最大元.

例 1.2.7 设 $A = \{1, 2, 3, 4, 6, 12\}$, 则 A 在整除关系下, 1 是最小元, 12 是最大元.

定义 1.2.11 设 (A, \leq) 是偏序集, 如果 $b \in A$, 而 A 中不存在元素 a , 使 $a \leq b$, 则称 b 是 (A, \leq) 的极小元. 如果 $c \in A$, 而 A 中不存在元素 a , 使 $c \leq a$, 则称 c 是 (A, \leq) 的极大元.

例 1.2.8 设 $A = \{2, 3, 4, 6, 8, 12\}$, 则在整除关系下, 2 和 3 是极小元, 8 和 12 是极大元, 而 A 中无最小元和最大元.

定义 1.2.12 设 (A, \leq) 是偏序集, $B \subseteq A$, 如果存在 $b \in A$, 使得对一切 $a \in B$ 都有 $a \leq b$, 则称 b 是 B 的上界. 如果存在 $b \in A$, 使得对一切 $a \in B$, 都有 $b \leq a$, 则称 b 是 B 的下界. 如果 b 是 B 的上界, 对于 B 的任意上界 c , 都有 $b \leq c$, 则称 b 是 B 的最小上界 (或称上确界). 如果 b 是 B 的下界, 对于 B 的任意下界 c , 都有 $c \leq b$, 则称 b 是 B 的最大下界 (或称下确界).

例 1.2.9 在例 1.2.8 中, 令 $B = \{2, 3\}$, 则 6 和 12 是 B 的上界, 6 是上确界, 而 B 无下界和下确界. 又令 $C = \{4, 8, 12\}$, 则 C 无上界和上确界, 2 和 4 是 C 的下界, 4 是 C 的下确界.

定义 1.2.13 设 (A, \leq) 是偏序集, 如果 A 的每个非空子集都有最小元, 则称 A 是良序集.

例如, 自然数上的小于等于关系是一个良序集.

显然, 任意的良序集都是全序集, 因为任意两个元素都有最小元, 所以任意两个元素都有序关系是全序集. 但全序集不一定是良序集. 例如, 实区间 (a, b) 在数的小于等于关系下是全序集, 但它无最小元, 所以不是良序集.

习题 1.2

1. 设 $A = \{a, b\}$, $B = \{x, y, z\}$, 求

1) $A \times B$; 2) $B \times A$; 3) $A \times A \times B$.

2. 设 $A = \{1, 2, 4, 6\}$, 列出下列关系 R :

1) $R = \{(x, y) \mid x, y \in A, x + y \neq 2\}$; 2) $R = \{(x, y) \mid x, y \in A, |x - y| = 1\}$;

3) $R = \{(x, y) \mid x, y \in A, \text{且 } \frac{x}{y} \in A\}$.

3. 设 $A = \{1, 2, 3, \dots, 10\}$, 定义 A 上关系

1) $R = \{(x, y) \mid x, y \in A, x + y = 10\}$; 2) $S = \{(x, y) \mid x, y \in A, \frac{x-y}{2} \text{ 是整数}\}$,

分别说明 R 和 S 具有什么性质?

4. 若 X 和 Y 是正整数集, $x_i \in X, y_i \in Y (i = 1, 2)$, 验证 $R = \{((x_1, x_2), (y_1, y_2)) \mid x_1 + y_2 = x_2 + y_1\}$ 是等价关系.

5. 设 $X = \{a, b, c, d\}$, R 是 X 上的等价关系, 且 $R = \{(a, a), (a, b), (b, a), (b, b), (c, c), (c, d), (d, c), (d, d)\}$, 求 X 的各元素的等价类.

6. 对于下列集合中的整除关系

1) $\{1, 2, 3, 4, 6, 8, 12, 24\}$; 2) $\{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$,

求它们的极小元, 最小元, 极大元和最大元.

7. 设 $A = \{1, 2, 3, \dots, 12\}$, “ \leq ”为整除关系, 又设 A 的子集 $B = \{2, 3, 4\}$, $C = \{2, 3, 6\}$, 在 (A, \leq) 中求 B 和 C 的上界, 下界, 上确界和下确界.

§ 1.3 映射的概念

映射是一种特殊的关系.它是数学中的基本概念之一.本书第二篇微积分部分将以某种特殊的映射——函数作为研究的对象.

定义 1.3.1 设 f 是 A 到 B 的关系,若 f 满足:对任意 $x \in A$,存在唯一的 $y \in B$,使得 $(x, y) \in f$,则称 f 是 A 到 B 的一个映射,记作 $f: A \rightarrow B$. y 称为 x 在映射 f 下的像, x 称为 y 的原像,记作 $y = f(x)$.

从定义可知,映射是一种特殊的关系,这种关系的特点在于,定义域 $\text{dom } f = A$,而且 A 中每个元素 x 的像是唯一的.

例 1.3.1 设 $A = \{x_1, x_2, x_3\}$, $B = \{y_1, y_2\}$, 又设 $f_1 = \{(x_1, y_1), (x_2, y_1), (x_3, y_2)\}$, $f_2 = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2)\}$, $f_3 = \{(x_1, y_1), (x_1, y_2), (x_2, y_2), (x_3, y_1)\}$. 问 f_1, f_2, f_3 是否为映射?

解 由定义 1.3.1, f_1 是映射. f_2 不是映射,因为 A 中 x_3 没有像,即 $\text{dom } f_2 \neq A$. f_3 也不是映射,因为 x_1 的像不唯一.

例 1.3.2 下面给出几种常用的特殊映射:

- 1) 设 $f: A \rightarrow B$, 若存在 $y \in B$, 使得对于任意 $x \in A$, $f(x) = y$, 则称 f 是常值映射.
- 2) 设 $f: A \rightarrow A$, 若对任意 $x \in A$, $f(x) = x$, 则称 f 是恒等映射, 记为 I_A .
- 3) 设 $f: E \rightarrow \{0, 1\}$, 使得当 $x \in A$ 时, $f(x) = 1$, 当 $x \notin A$ 时, $f(x) = 0$, 则称 f 是 A 的特征函数, 记作 χ_A .
- 4) 设 R 是集合 A 上的等价关系, A/R 是 A 关于 R 的商集, 则 $f: A \rightarrow A/R$, $f(a) = [a]$ 是 A 到 A/R 的自然映射.

定义 1.3.2 设 $f: A \rightarrow B$, 则

- 1) 若对任意 $y \in B$, 都有 $x \in A$, 使 $f(x) = y$, 即 $\text{ran } f = B$, 则称 f 是满射;
- 2) 若对任意 $x_1, x_2 \in A$, $x_1 \neq x_2$ 时有 $f(x_1) \neq f(x_2)$, 则称 f 是单射;
- 3) 若 f 既是满射又是单射, 则称 f 是双射.

例 1.3.3 判断下列映射是满射, 单射还是双射:

- 1) $f: R \rightarrow R, f(x) = 2x^2$;
- 2) $f: N \rightarrow R, f(x) = \ln x$;
- 3) $f: R \rightarrow Z, f(x) = [x]$, $[x]$ 表示不大于 x 的最大整数, 称之为取整函数;
- 4) $f: R \rightarrow R, f(x) = x^3$.

解 1) 因为 $f(x) = 2x^2$ 是最小值为零的开口向上的抛物线, 小于零的实数没有原像, 所以 f 不是满射. 又对于任意 $x \in R$, $f(x) = f(-x) = 2x^2$, 所以 f 也不是单射.

2) $f(x) = \ln x$ 是单射, 但不是满射, 因为 $\text{ran } f = \{\ln 1, \ln 2, \dots\} \subset R$.

3) $f(x) = [x]$ 是满射, 但不是单射, 例如, $f(1.2) = f(1.3) = 1$.

4) $f(x) = x^3$ 是双射, 因为 $\text{ran } f = R$, 且 $x_1 \neq x_2$ 时, $f(x_1) = x_1^3 \neq x_2^3 = f(x_2)$.

定义 1.3.3 设 $f: A \rightarrow B, g: B \rightarrow C$, 定义映射 $g \circ f: A \rightarrow C$, 对任意 $x \in A$, $g \circ f(x) = g(f(x))$, 则称 $g \circ f$ 为 f 与 g 的复合映射.

定理 1.3.1 设 $f: A \rightarrow B, g: B \rightarrow C$.