

游戏开发工程师数学基础

木头骨头石头

2025 年 10 月 4 日

目录

1	集合论简介	7
1.1	朴素集合论	7
1.2	ZFC 公理集合论	8
1.2.1	外延公理	8
1.2.2	配对公理	9
1.2.3	分类公理模式	9
1.2.4	并集公理	11
1.2.5	幂集公理	12
1.2.6	无穷公理	13
1.2.7	替代公理模式	14
1.2.8	正则公理	15
1.2.9	选择公理	16
2	关系与结构	17
2.1	二元关系	18
2.1.1	二元关系的定义	18
2.1.2	关系矩阵与关系图	19
2.1.3	自反性与反自反性	19
2.1.4	对称性与反对称性	20
2.1.5	传递性	21
2.2	函数	22
2.2.1	集合的势	22
2.3	等价关系	24
2.3.1	划分	25
2.4	代数结构	26
2.4.1	代数常数	26
2.4.2	代数算律	27
2.4.3	同态与同构	28
2.4.4	群	28
2.4.5	环与域	29
2.4.6	模与线性空间	31
2.5	序结构	32
2.5.1	上下界	32

2.6	拓扑结构	34
2.6.1	连续函数	35
2.6.2	度量空间	35
3	数系的扩充	37
3.1	整数	37
3.2	有理数	40
3.3	实数	43
3.3.1	柯西序列与实数	43
3.3.2	实数集的完备性	48
3.3.3	实数的幂运算	49
3.4	复数	51
3.4.1	复数的定义	51
3.4.2	复数集的完备性	53
3.4.3	复数的幂运算	54
3.4.4	复数的三角式	55
3.4.5	复数的指数式	56
3.5	四元数	57
3.5.1	四元数的定义	57
3.5.2	四元数与旋转	59
3.5.3	对偶四元数	59
4	抽象代数	61
4.1	群	61
4.1.1	群的定义	61
4.1.2	子群	62
4.1.3	群同态与群同构	62
4.1.4	群的直和	63
4.1.5	群作用	64
4.1.6	幂运算与循环群	64
4.1.7	变换与变换群	65
4.1.8	置换与置换群	66
4.1.9	线性变换与线性群	67
4.1.10	陪集与群划分	69
4.1.11	正规子群与商群	71
4.1.12	群同态基本定理	73
4.2	环	74
4.2.1	环的基本概念	74
4.2.2	多项式环	76
4.2.3	理想与商环	76
4.2.4	环同态基本定理	78
4.3	域	80
4.3.1	域的基本概念	80

4.3.2	域扩张	80
4.3.3	伽罗瓦理论	82
5	线性代数	85
5.1	线性空间	85
5.1.1	线性空间的定义	85
5.1.2	线性相关性	86
5.1.3	基底与维数	87
5.1.4	赋范线性空间	88
5.1.5	内积空间	89
5.1.6	正交性与投影	90
5.1.7	柯西-施瓦茨不等式	91
5.2	线性映射	92
5.2.1	线性映射与同构	92
5.2.2	线性映射空间	93
5.3	矩阵	96
5.3.1	矩阵的定义	96
5.3.2	矩阵与线性映射	97
5.3.3	矩阵的秩	98
5.3.4	矩阵的转置	99
5.3.5	方阵的行列式	100
5.3.6	方阵的逆	102
5.3.7	线性方程组的解	103
5.3.8	坐标变换矩阵	104
5.3.9	相似矩阵	105
5.4	特征值与特性向量	107
5.4.1	特征多项式与特征值	107
5.4.2	特征子空间与不变子空间	110
5.4.3	矩阵的相似不变量	111
5.5	特殊矩阵	112
5.5.1	厄米矩阵与厄米算子	112
5.5.2	正交矩阵与酉矩阵	113
5.5.3	三角矩阵与可三角化矩阵	115
5.5.4	对角矩阵与可对角化矩阵	116
5.5.5	二次型与对称半定矩阵	118
5.6	矩阵分解	121
5.6.1	LU 分解	121
5.6.2	Cholesky 分解	122
5.6.3	QR 分解	122
5.6.4	特征值分解	123
5.6.5	奇异值分解	123
5.6.6	极分解	124
5.7	指标记号	126

5.7.1	自由指标	126
5.7.2	哑指标求和约定	126
5.7.3	克罗内克尔符号	127
5.8	张量代数	128
5.8.1	多重线性泛函	128
5.8.2	对偶线性空间	128
5.8.3	张量的定义	129
5.8.4	协变基与逆变基	130
5.8.5	张量的缩并	132
5.8.6	度量张量	133
5.8.7	外形式与外积	135
5.9	解析几何	139
5.9.1	直线与平面	139
5.10	射影几何	140
5.10.1	平行投影与中心投影	140
5.10.2	射影平面	140
6	点集拓扑	141
6.1	拓扑空间的定义	141
6.1.1	开集与闭集	141
6.1.2	领域和聚点	142
6.1.3	集合的内部与闭包	144
6.1.4	集合的边界与外部	145
6.1.5	拓扑基	147
6.1.6	子空间拓扑	147
6.2	度量空间的定义	148
6.3	连续函数与同胚	149

Chapter 1

集合论简介

1.1 朴素集合论

集合 (Set) 是由一些事物汇集一起组成的整体，这些事物称为集合的**元素 (Element)**。集合通常用大写英文字母表示，集合中的元素用小写字母表示。不含任何元素的集合称为空集，记为 \emptyset 。集合有如下三个特性：

1. **无序性**：集合中每个元素的地位是相同的，元素之间是无序的。当然，我们可以在集合上定义偏序关系之后，元素之间可以依次排序。但就集合本身，元素之间是没有必然的序的。
2. **互异性**：集合中的元素是互不相同的，每个元素只出现一次。
3. **确定性**：给定一个集合 A ，任何一个对象要么属于集合 A ，要么不属于集合 A ，二者必居其一，不允许有模棱两可的情况出现。

公理 1.1.1 (概括公理模式 Axiom Schema of Comprehension). 假设任意属性 $P(x)$ ，存在一个集合 A ，使得对于任意对象 x ， $x \in A$ 当且仅当 $P(x)$ 为真。集合 A 记为 $\{x|P(x)\}$ 或 $\{x:P(A)\}$ 。

注解

公理 (Axiom) 是一条命题。公理模式 (Axiom Schema) 中的谓词 P 是可变的，公理模式实际上包含无穷多条公理。选择具体的一个谓词，就得到一条命题。

概括公理模式是朴素集合论中构造集合的基本方法，换句话说，存在一个包含万事万物的集合，任选一条属性，都能从中筛选元素建构新的集合。概括公理模式限制太少，所以蕴含一个经典的悖论——**罗素悖论 (Russell's Paradox)**，若存在一个集合 R ，它是由“所有不包括自身的集合”所组成，也即

$$R = \{x : x \notin x, x \text{ is a set}\}$$

那么， R 是否包含自身呢？如果 $R \in R$ ，那么根据 R 的定义， $R \notin R$ ；反之，如果 $R \notin R$ ，那么根据 R 的定义， $R \in R$ 。无论哪种情况，都会导致矛盾。消解罗素悖论需要提出新的公理。**ZFC 公理系统**是通过限制概括公理模式来规避罗素悖论。在 **NBG 公理系统**中，引入比集合更高阶的“类 (Class)”，从而避免讨论“包含所有集合的集合”，而是“包含所有集合的类”。下面主要介绍 ZFC 公理系统。

1.2 ZFC 公理集合论

为了消解罗素悖论，需要限制概括公理模式。为此，数学家 Zermelo 和 Fraenkel 提出了一套公理定义集合，称为 **ZF 公理集合论 (ZF Axiomatic Set Theory)**，在 ZF 公理集合论的基础上加上选择公理 (**Axiom of Choice**) 就是 **ZFC 公理集合论**。ZFC 公理集合论一共有九条公理：

1. **外延公理 Axiom of extensionality**: 设 A, B 是集合，说 A 和 B 是相等的，记作 $A = B$ ，当且仅当，两个集合有相同的元素。
2. **配对公理 Axiom of pairing**: 对于任意集合（或元素） a, b ，存在一个集合 $\{a, b\}$ 包含 a, b 。
3. **分类公理模式 Axiom schema of specification**: 设 A 是一个集合，并对于每个 $x \in A$ ，设 $P(x)$ 是一个关于 x 的性质。那么存在一个集合 $\{x \in A : P(x)\}$ ，它的元素是 A 中使 $P(x)$ 成立的所有 x 。
4. **并集公理 Axiom of union**: 对于集合 A ，存在集合 $\cup A$ 。 $\forall u \in \cup A$ ，存在集合 $B \in A$ ，使得 $u \in B$ 。
5. **幂集公理 Axiom of power set**: 对于集合 A ，存在集合 $\mathcal{P}(A)$ 是所有 A 的子集的集合，称为幂集。
6. **无穷公理 Axiom of infinity**: 存在集合 A ，使得 $\emptyset \in A$ ，且任意对象 $a \in A$ 都有 $a \cup \{a\} \in A$ 。
7. **替代公理模式 Axiom schema of replacement**: 设属性 $P(x, y)$ ，对于每个 x 唯一确定一个 y 使得 $P(x, y)$ 成立。则对于任意集合 A ，存在集合 B ，任意 $b \in B$ ，存在 $a \in A$ 使得 $P(a, b)$ 成立。
8. **正则公理 Axiom of regularity**: 任意非空集合 A 包含一个元素 x ，使得 $x \cap A = \emptyset$ 。
9. **选择公理 Axiom of choice**: 任意由非空集合组成的集族 \mathcal{F} ，存在一个选择函数 f ，使得对每个 $A \in \mathcal{F}$ ，有 $f(A) \in A$ 。

1.2.1 外延公理

公理 1.2.1 (外延公理 Axiom of extensionality). 设 A, B 是集合，说 A 和 B 是相等的，记作 $A = B$ ，当且仅当，两个集合有相同的元素。

注解

外延公理说明一个集合完全由它的元素决定。通过外延公理，可以定义子集。

子集

定义 1.2.1 (子集 Subset). 设 A, B 是集合，说 A 是 B 的子集，记作 $A \subseteq B$ ，当且仅当， A 的每个元素都是 B 中的元素。

定理 1.2.1. 若两个集合互为对方的子集，两集合相等。也即，设 A, B 是集合，如果 $A \subseteq B$ 且 $B \subseteq A$ ，则 $A = B$ 。

1.2.2 配对公理

公理 1.2.2 (配对公理 Axiom of pairing). 对于任意集合 (或元素) a, b , 存在一个集合 $\{a, b\}$ 包含 a, b 。

注解

外延公理和配对公理说明, 集合中的元素都是独一无二的, 且没有顺序, 比如:

$$\{1, 2\} = \{2, 1\}, \{1, 1\} = \{1\}$$

通过配对公理, 可以定义有序对。

有序对

定义 1.2.2 (有序对 Ordered Pair). 由两个元素 x 和 y 按一定顺序排列成的二元组称为一个有序对或序偶, 记为: (x, y) , 其中 x 是它的第一个元素, y 是第二个, 那么

$$(x, y) := \{x, \{x, y\}\}$$

命题 1.2.1 (有序对的性质). 设 x, y 是元素, (x, y) 是有序对, 那么

1. 当 $x = y$ 时, $(x, y) = (y, x)$; 当 $x \neq y$ 时, $(x, y) \neq (y, x)$
2. $(x, y) = (u, v)$ 当且仅当 $x = u, y = v$

定义 1.2.3 (有序数组 Ordered n-Tuple). 由 n 个元素 x_1, x_2, \dots, x_n 按一定顺序排列成的 n 元组称为一个有序数组, 记为: (x_1, x_2, \dots, x_n) , 其中 x_1 是它的第一个元素, x_2 是第二个, 依此类推, 那么

$$(x_1, x_2, \dots, x_n) := ((x_1, x_2, \dots, x_{n-1}), x_n)$$

命题 1.2.2. 两个 n 元有序数组 $(a_1, \dots, a_n) = (b_1, \dots, b_n)$ 相等, 当且仅当, $a_1 = b_1, \dots, a_n = b_n$

1.2.3 分类公理模式

公理 1.2.3 (分类公理模式 Axiom schema of specification). 设 A 是一个集合, 并对于每个 $x \in A$, 设 $P(x)$ 是一个关于 x 的性质。那么存在一个集合 $\{x \in A : P(x)\}$, 它的元素是 A 中使 $P(x)$ 成立的所有 x 。

注解

分类公理模式是 ZFC 公理集合论中构造集合的方式, 与朴素集合论的概括公理模式相比, 它是从一个已知集合中挑选元素构造一个子集, 而不是直接构造所有满足性质 P 的集合。因此通过分类公理模式可以定义空集、交集、差集、补集……但不能定义并集。并集需要从已知集合构造一个更大的, 包含已知集合的集合, 这需要并集公理。

空集

定义 1.2.4 (空集 Empty). 对于任意集合 A , 集合:

$$\{x \in A : x \neq x\}$$

称为空集, 记为 \emptyset

注解

因为满足性质 $x \neq x$ 的元素并不存在, 所以 \emptyset 中不包含任何元素。根据定义, 空集是任意集合的子集。

交集

定义 1.2.5 (交集 Intersection). 两个集合 A 和 B 的交是一个集合, 记为 $A \cap B$, 那么

$$A \cap B := \{x \in A : x \in B\}$$

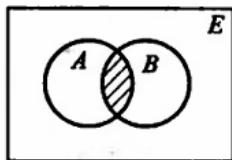


图 1.1: 交集

定义 1.2.6 (分离 Disjoint). 两个集合 A 和 B 是分离的, 当且仅当: $A \cap B = \emptyset$

差集

定义 1.2.7 (差集 Difference). 两个集合 A 和 B 的差是一个集合, 记为 $A - B$ 或 $A \setminus B$, 那么

$$A \setminus B := \{x \in A : x \notin B\}$$

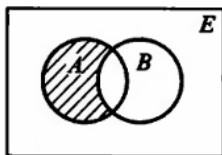


图 1.2: 差集

补集

定义 1.2.8 (补集). 设集合 E 和 A , $A \subseteq E$, A 的补集记为 $\complement_E A$, 那么

$$\complement_E A := E \setminus A = \{x \in E : x \notin A\}$$

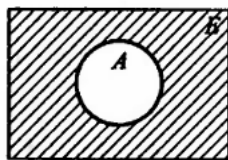


图 1.3: 补集

1.2.4 并集公理

定义 1.2.9 (并集 Union). 两个集合 A 和 B 的并是一个集合, 记为 $A \cup B$, 那么

$$A \cup B := \{x : x \in A \text{ or } x \in B\}$$

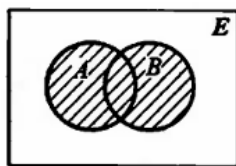


图 1.4: 并集

定义 1.2.10 (对称差 Symmetric Difference). 两个集合 A 和 B 的对称差是一个集合, 记为 $A \oplus B$, 那么:

$$A \oplus B := (A - B) \cup (B - A)$$

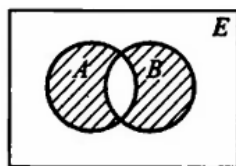


图 1.5: 并集

命题 1.2.3 (集合常用算律). 设 A, B, C 是集合

1. 幂等律: $A \cup A = A$, $A \cap A = A$
2. 结合律: $A \cup (B \cup C) = (A \cup B) \cup C$, $A \cap (B \cap C) = (A \cap B) \cap C$
3. 交换律: $A \cup B = B \cup A$, $A \cap B = B \cap A$
4. 分配律: $A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$, $A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$

5. 排中律: $A \cup \complement_E A = E$

6. 矛盾律: $A \cap \complement_E A = \emptyset$

7. 德摩根律:

$$(a) \quad A - (B \cup C) = (A - B) \cap (A - C)$$

$$(b) \quad A - (B \cap C) = (A - B) \cup (A - C)$$

$$(c) \quad \complement_E(B \cup C) = \complement_E B \cap \complement_E C$$

$$(d) \quad \complement_E(B \cap C) = \complement_E B \cup \complement_E C$$

8. 双重否定率: $\complement_E(\complement_E A) = A$

1.2.5 幂集公理

公理 1.2.4 (幂集公理 Axiom of power set). 对于集合 A , 存在集合 $\mathcal{P}(A)$ 是所有 A 的子集的集合, 称为幂集。

注解

换句话说, 集合 A 的幂集是 A 全体子集构成的集合。通过幂集公理, 同样可以从已知集合构造更大的集合。有序对的定义:

$$(a, b) := \{a, \{a, b\}\}$$

如果 $a \in A, b \in B$, 那么:

$$(a, b) \in \mathcal{P}(\mathcal{P}(A \cup B))$$

通过并集公理和幂集公理, 构造集合 $\mathcal{P}(\mathcal{P}(A \cup B))$, 通过分离公理模式, 分离出有序对的集合, 从而可以定义两个集合的笛卡尔积。

笛卡尔积

定义 1.2.11 (笛卡尔积 Cartesian Product). 设 A, B 为集合, A, B 的笛卡尔积记为 $A \times B$, 那么

$$A \times B := \{(x, y) \in \mathcal{P}(\mathcal{P}(A \cup B)) : x \in A, y \in B\}$$

递归地, 可以定义 n 个集合 S_1, S_2, \dots, S_n 的笛卡尔积, 记为 $\prod_{i=1}^n S_i$, 那么

$$(x_1, x_2, \dots, x_n) \in \prod_{i=1}^n S_i$$

特别地, 当 $S_i = S$ 时, $\prod_{i=1}^n S_i$ 记为 S^n 。

注解

笛卡尔积是构造有序对集合的基本方法。有了有序对的集合, 再通过分离公理模式, 从中分离出我们感兴趣的有序对, 从而构建起集合元素之间的关系, 比如, 等价关系、偏序关系、函数关系等。集合+关系构成现代数学的基础。布尔巴基学派认为, 现代数学的理论大多是集合与某种关系的组合的研究, 比如, 代数结构(群、环、域等)是集合与代数运算关系的组合, 序结构(偏序集、全序集等)是集合与序关系的组合, 拓扑结构(拓扑空间、度量空间等)是集合与邻近关系的组合。

命题 1.2.4 (笛卡尔积的性质). 设 A, B, C 为集合,

1. 笛卡尔积不满足结合律

$$(a) (A \times B) \times C \neq A \times (B \times C)$$

2. 笛卡尔积通常不满足交换律

$$(a) A \times B \neq B \times A$$

3. 笛卡尔积对集合交并满足分配律

$$(a) A \times (B \cup C) = (A \times B) \cup (A \times C)$$

$$(b) (B \cup C) \times A = (B \times A) \cup (C \times A)$$

$$(c) A \times (B \cap C) = (A \times B) \cap (A \times C)$$

$$(d) (B \cap C) \times A = (B \times A) \cap (C \times A)$$

1.2.6 无穷公理

公理 1.2.5 (无穷公理 Axiom of Infinity). 存在集合 A , 使得 $\emptyset \in A$, 且任意对象 $a \in A$ 都有 $a \cup \{a\} \in A$

注解

无穷公理断言了无穷集的存在, 但这种“无穷”并不是像朴素集合论那样不加限制的无穷, 而是对后继 (successor) 操作 $a \cup \{a\}$ 封闭的无穷, 也即 $\forall a \in A$ 都存在其后继 $a \cup \{a\} \in A$ 。满足这一性质的集合, 也称为归纳集 (Inductive Set)。自然数的递归定义依赖于无穷公理。数学归纳法的有效性依赖于自然数集的无限性。若没有无穷公理, 归纳法只能应用于有限步骤。

自然数

定义 1.2.12 (自然数 Natural numbers). 通过无穷公理, 我们可以无限递归地定义每一个自然数:

1. 令 $0 := \emptyset$

2. 任意自然数 n 的后继 $S(n)$, 那么 $S(n) := n \cup \{n\}$

无穷公理说明, 集合 $n \cup \{n\}$ 的存在, 记所有自然数的集合记为 \mathbb{N} 。

定义 1.2.13 (自然数的序). 设 $\forall m, n \in \mathbb{N}$ 是自然数, 我们说 n 大于等于 m , 记作 $n \geq m$ 或 $m \leq n$, 当且仅当 $m \subseteq n$ 。

注解

根据自然数的定义，

$$\begin{aligned}
 0 &= \{\} = \emptyset \\
 1 &= 0 \cup \{0\} = \{0\} = \{\emptyset\} \\
 2 &= 1 \cup \{1\} = \{0, 1\} = \{\emptyset, \{\emptyset\}\} \\
 3 &= 2 \cup \{2\} = \{0, 1, 2\} = \{\emptyset, \{\emptyset\}, \{\emptyset, \{\emptyset\}\}\} \\
 &\vdots
 \end{aligned}$$

1.2.7 替代公理模式

公理 1.2.6 (替代公理模式 Axiom Schema of Replacement). 设属性 $P(x, y)$, 对于每个 x 唯一确定一个 y 使得 $P(x, y)$ 成立。则对于任意集合 A , 存在集合 B , 任意 $b \in B$, 存在 $a \in A$ 使得 $P(a, b)$ 成立。

注解

属性 $P(x, y)$ 类似于“函数”（因为函数是通过集合公理定义的，所以在集合公理中避免谈及“函数”），也即 x 对应唯一的 y 。通过替代公理模式，可以将已知集合 A 中的元素 x 替换为 y 生成一个新的集合 B 。通过替代公理模式，可以递归地定义自然数的加法与乘法。

自然数的加法与乘法

定义 1.2.14 (自然数的加法). 设 m 是自然数，

1. $m + 0 := m$
2. 任意自然数 n 的后继为 $S(n)$, $m + S(n) := S(m + n)$

注解

替代公理模式断言了属性 $P(m, 0) = m + 0$ 和 $P(m, n) = m + S(n)$ 的存在，再根据无穷公理，可以递归的定义任意自然数 m 与 n 的加法：

$$\begin{aligned}
 m + 0 &= m \\
 m + 1 &= m + S(0) = S(m + 0) = S(m) \\
 m + 2 &= m + S(1) = S(m + 1) = S(S(m + 0)) = S(S(m)) \\
 m + 3 &= m + S(2) = S(m + 2) = S(S(S(m + 0))) = S(S(S(m))) \\
 &\vdots
 \end{aligned}$$

定义 1.2.15 (自然数的乘法). 设 m 是自然数,

1. $m \times 0 := 0$
2. 任意自然数 n 的后继为 $S(n)$, $m \times S(n) := m \times n + m$

注解

替代公理模式断言了属性, $P(m, 0) = m \times 0$ 和 $P(m, n) = m \times S(n)$ 的存在, 再根据无穷公理, 可以递归的定义任意自然数 m 与 n 的乘法:

$$\begin{aligned}
 m \times 0 &= 0 \\
 m \times 1 &= m \times S(0) = m \times 0 + m = m \\
 m \times 2 &= m \times S(1) = m \times 1 + m = m \times 0 + m + m = m + m \\
 m \times 3 &= m \times S(2) = m \times 2 + m = m \times 0 + m + m + m = m + m + m \\
 &\vdots
 \end{aligned}$$

命题 1.2.5 (自然数的性质). 设任意 $a, b, c \in \mathbb{N}$ 是自然数, 有:

1. 加法交换律: $a + b = b + a$
2. 加法结合律: $(a + b) + c = a + (b + c)$
3. 乘法交换律: $a \times b = b \times a$
4. 乘法结合律: $(a \times b) \times c = a \times (b \times c)$
5. 乘法对加法的分配律: $a \times (b + c) = a \times b + a \times c$
6. 加法单位元: 0
7. 乘法的零元: 0
8. 乘法的单位元: 1

1.2.8 正则公理

公理 1.2.7 (正则公理 Axiom of Regularity). 任意非空集合 A 包含一个元素 x , 使得 $x \cap A = \emptyset$.

注解

换句话说, 如果 A 是一个非空集合, 其中至少包含一个元素 x , 它要么不是集合, 要么是与 A 完全不同的集合。正则公理也称为**基础公理 (Foundation Axiom)**, 它断言了不存在以自身为元素的集合, 从而避免罗素悖论。

1.2.9 选择公理

定义 1.2.16 (集族 Family of Sets). 以集合为元素的集合称为集族。集族常用大写的花体字母 $\mathcal{A}, \mathcal{B}, \mathcal{C}$ 表示。比如, 集合 A 的幂集 $\mathcal{P}(A)$; 集合 A 的拓扑 $\mathcal{T}(A)$ 。集合 A 的 σ 代数 $\mathcal{M}(A)$

公理 1.2.8 (选择公理 Axiom of Choice). 任意由非空集合组成的集族 \mathcal{F} , 存在一个选择函数 f , 使得对每个 $A \in \mathcal{F}$, 有 $f(A) \in A$

注解

选择公理说明, 无论集合族的结构如何复杂, 总能为每个集合选出一个代表元素。选择公理仅断言选择函数存在, 但不提供具体构造方法。这与构造主义数学的哲学相冲突, 但被经典数学广泛接受。

Chapter 2

关系与结构

任意两事物之间存在某种关系 (Relation)，比如数之间的大小关系、相等关系，相似关系、正交关系、共线关系等。这些关系可以用关系谓词来叙述，比如 a 大于 b 、点 A 与点 B 共线、整数 x 整除整数 y 等。在没有定义元素之间的关系前，集合只是一堆元素的“堆砌”，我们只能讨论集合与集合的包含关系，集合与元素的从属关系。当定义了元素之间的关系时，集合就会表现出某些性质，就称这个集合具备了某种结构 (Structure)。

受结构主义 (Structuralism) 思潮的影响，在二十世纪初，布尔巴基学派 (Bourbaki) 的数学家主张在集合论的基础上，通过元素之间的关系定义数学对象。集合限定了讨论对象的范围；关系是集合的笛卡尔积，通过分类公理模式筛选出来的子集；集合与关系一起构成了数学对象的结构。布尔巴基学派提出三种基本数学结构：

1. 代数结构 Algebraic Structure：群、环、域、向量空间等，研究运算与代数性质，作为代数学的基础
2. 序结构 Order Structure：偏序集、全序集等，研究元素之间的顺序关系，作为分析学的基础
3. 拓扑结构 Topological Structure：拓扑空间、度量空间等，研究元素之间的邻近关系，作为几何学的基础

布尔巴基学派认为，现代数学的理论大多是这些结构或其组合的研究，比如，如拓扑群、赋范向量空间、序拓扑等。布尔巴基学派深刻的影响了 20 世纪的数学以及数学教育的发展，现代主流的数学教材大多遵循布尔巴基学派的思想编写。

布尔巴基学派活跃于 20 世纪上半叶。到了二十世纪下半叶，范畴论 (Category Theory) 继承与发展了结构主义思想，提出一种更为抽象和统一的视角来研究数学对象及其关系。结构主义是在集合公理的基础上，利用关系定义数学对象。而在范畴论中，数学对象被视为范畴中的对象 (Objects)，对象之间的关系被视为态射 (Morphisms)。范畴论强调对象之间的关系和变换，而不是对象本身的内部结构。

2.1 二元关系

2.1.1 二元关系的定义

定义 2.1.1 (关系 Relation). 设 X_1, X_2, \dots, X_n 为集合, 存在属性 P , 使得有序数组 (x_1, x_2, \dots, x_n) 满足该属性, 则称 P 为 X_1, X_2, \dots, X_n 上的一个 n 元关系 (n -ary Relation), 记为 R , 那么

$$R = \{(x_1, x_2, \dots, x_n) \in \prod_{i=1}^n X_i : P(x_1, x_2, \dots, x_n)\}$$

特别的, 当 $n = 2$, 称为**二元关系 (Binary Relation)**。若 $(a, b) \in R$, 记为 aRb 。二元关系 R 中所有有序对的第一个元素构成的集合称为 R 的**定义域 (Domain)**, 记为 $\text{dom}R$; 二元关系 R 中所有有序对的第二个元素构成的集合称为 R 的**值域 (Range)**, 记为 $\text{ran}R$ 。

定义 2.1.2 (二元关系的逆 Inverse). 设 R 为集合 X, Y 上的二元关系, 则 R 的**逆 (Inverse)**, 记为 R^{-1} , 定义为

$$R^{-1} = \{(y, x) \in Y \times X : (x, y) \in R\}$$

定义 2.1.3 (二元关系的复合 Composition). 设 R 为集合 X, Y 上的二元关系, S 为集合 Y, Z 上的二元关系, 则 R, S 的**复合 (Composition)**, 记为 $S \circ R$, 定义为

$$S \circ R = \{(x, z) \in X \times Z : \exists y \in Y [(x, y) \in R \wedge (y, z) \in S]\}$$

定义 2.1.4 (恒等关系 Identity Relation). 设 X 为集合, 则 X 上的**恒等关系 (Identity Relation)**, 记为 I_X , 定义为

$$I_X = \{(x, x) : x \in X\}$$

命题 2.1.1. 设 R, S, T 为适当集合上的二元关系, 则有

1. $(R^{-1})^{-1} = R$
2. $(S \circ R)^{-1} = R^{-1} \circ S^{-1}$
3. $T \circ (S \circ R) = (T \circ S) \circ R$
4. $F \circ (S \cup R) = (F \circ S) \cup (F \circ R)$
5. $(S \cup R) \circ F = (S \circ F) \cup (R \circ F)$
6. $F \circ (S \cap R) \subseteq (F \circ S) \cap (F \circ R)$
7. $(S \cap R) \circ F \subseteq (S \circ F) \cap (R \circ F)$

2.1.2 关系矩阵与关系图

定义 2.1.5 (关系矩阵). 设 R 为有限集 X, Y 上的二元关系, 则 R 的关系矩阵 (*Relation Matrix*) 记为 M_R , 其中每一个分量定义为:

$$m_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{if } (x_i, y_j) \in R \\ 0, & \text{if } (x_i, y_j) \notin R \end{cases}$$

其中 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$ 。

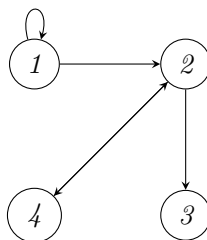
例 2.1.1. 设一个二元关系 $R = \{\langle 1, 1 \rangle, \langle 1, 2 \rangle, \langle 2, 3 \rangle, \langle 2, 4 \rangle, \langle 4, 2 \rangle\}$, 其关系矩阵为

$$M_R = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

定义 2.1.6 (关系图). 设 R 为有限集 X, Y 上的二元关系, 则 R 的关系图 (*Relation Graph*) 为一个有向图 $G_R = (V, E)$, 其中

- 顶点集 $V = X$;
- 边集 $E = \{(x_i, x_j) : (x_i, x_j) \in R\}$ 。

例 2.1.2. 在例 2.1.1 中, 关系 R 的关系图为:



2.1.3 自反性与反自反性

定义 2.1.7. 设 R 为集合 X 上的二元关系,

1. 自反性 *Reflexivity*: 若对任意 $x \in X$, $(x, x) \in R$, 则称 R 具有自反性。
2. 反自反性 *Irreflexivity*: 若对任意 $x \in X$, $(x, x) \notin R$, 则称 R 具有反自反性。

命题 2.1.2. 设 R 为集合 X 上的二元关系, 则有

1. R 是自反的, 当且仅当, $I_X \subseteq R$
2. R 是反自反的, 当且仅当, $I_X \cap R = \emptyset$

注解

如果 X 是有穷集合, 通过关系矩阵或关系图可以更直观的判断该二元关系是否具有自反性或反自反性:

1. 关系矩阵: 自反性对应矩阵的主对角线全为 1; 反自反性对应矩阵的主对角线全为 0
2. 关系图: 自反性对应每个节点都有一个指向自身的环; 反自反性对应没有节点有指向自身的环

自反性说明该集合中任意一个元素与其自身的都有关系, 比如实数集上的等于关系, 自然数集上的整除关系等; 反之, 如果如果集合中任意一个元素与其自身没有关系, 那么这种二元关系具有反自反性, 比如实数集上的大于关系。不具有自反关系的二元关系不一定是反自反的, 比如一个二元关系: a 与 a 的乘积是偶数, 这个二元关系在偶数集上是自反的、在奇数集上是反自反的、在自然数集上既不是自反的, 也不是反自反的。

2.1.4 对称性与反对称性

定义 2.1.8. 设 R 为集合 X 上的二元关系,

1. 对称性 *Symmetry*: 任意 $x, y \in X$, 如果 $(x, y) \in R$ 那么 $(y, x) \in R$, 则称 R 具有对称性。
2. 反对称性 *Antisymmetry*: 任意 $x, y \in X$ 如果 $(x, y) \in R$ 且 $(y, x) \in R$ 那么 $x = y$, 则称 R 具有反对称性。

命题 2.1.3. 设 R 为集合 X 上的二元关系, 则有

1. R 是对称的, 当且仅当, $R = R^{-1}$
2. R 是反对称的, 当且仅当, $R \cap R^{-1} \subseteq I_X$

注解

如果 X 是有穷集合, 通过关系矩阵或关系图可以更直观的判断该二元关系是否具有对称性或反对称性:

1. 关系矩阵: 对称性对应矩阵关于主对角线对称; 反对称性对应矩阵关于主对角线对称的位置上不同时为 1
2. 关系图: 对称性对应每一条有向边 (x, y) 都有一条与之反向的边 (y, x) ; 反对称性对应没有两个不同的节点之间有相互指向的边

对称性说明二元关系与其逆关系是同一个集合, 比如实数集上的相等关系是对称的; 整数集上模 n 同余是对称的; 一个二元关系: a 和 b 在 C 公司是同事也是对称的。另一方面, 整数集上的整除关系是反对称的, 实数集上的大于等于关系也是反对称的。对称关系和反对称关系并不是互斥的, 比如集合 A 上的恒等关系既是对称的, 也是反对称的。

2.1.5 传递性

定义 2.1.9. 设 R 为集合 X 上的二元关系，若对任意 $x, y, z \in X$ ，如果 $(x, y) \in R$ 且 $(y, z) \in R$ 那么 $(x, z) \in R$ ，则称 R 具有**传递性** (*Transitivity*)。

命题 2.1.4. 设 R 为集合 X 上的二元关系，则有 R 是传递的，当且仅当， $R \circ R \subseteq R$

注解

如果 X 是有穷集合，通过关系矩阵或关系图可以更直观的判断该二元关系是否具有传递性：

1. 关系矩阵：传递性对应矩阵的平方中非零元素对应的位置在原矩阵中也为非零
2. 关系图：传递性对应如果存在从节点 x 到节点 y 的路径，且存在从节点 y 到节点 z 的路径，那么必然存在从节点 x 到节点 z 的路径

实数集上的小于等于关系；整数集上的整除关系；集合的包含关系都具有传递性。集合 A 上的全域，恒等关系也是传递关系。

2.2 函数

定义 2.2.1 (函数 Function). 设 X, Y 为集合, f 为 X, Y 上的二元关系, f 称为 X 到 Y 的一个函数 (Function), 当且仅当, f 满足:

1. 唯一性: $\forall x \in \text{dom}f$, 如果 $(x, y_1) \in f$ 且 $(x, y_2) \in f$, 则 $y_1 = y_2$

记作 $f: X \rightarrow Y$, 记 xfy 为 $y = f(x)$ 。定义域 $\text{dom}f$ 也称为函数的原像 (Preimage), 值域 $\text{ran}f$ 也称为函数的像 (Image), 也常记为 $\text{im}f$ 或 $f(X)$ 。

注解

函数是一种特殊的二元关系, 其唯一性说明, 若对任意 $x \in X$, 在 f 中存在唯一的 $y \in Y$, 使得 $(x, y) \in f$ 。不存在一个 $x \in X$, 对应多个 $y \in Y$ 的情况。函数的复合的复合也即二元关系的复合。函数的逆不一定是函数, 因为可能存在 $y \in Y$, 对应多个 $x \in X$ 的情况, 不满足唯一性。

定义 2.2.2. 设 $f: X \rightarrow Y$ 为函数, 若

1. **满射 (Surjection)**: 如果 $\text{ran}f = Y$, 则称 f 为满射。
2. **单射 (Injection)**: 如果 $\forall y \in \text{ran}f$, $(x_1, y) \in f$ 且 $(x_2, y) \in f$, $x_1 = x_2$, 则称 f 为单射。
3. **双射 (Bijection)**: 如果 f 同时为单射与满射, 则称 f 为双射。

2.2.1 集合的势

对于一个有穷集合, 我们可以用一个自然数表示集合的大小, 并根据自然数的大小比较集合的大小。这是对集合“大小”非常朴素的认识, 并没有严格定义, 而且推广到无穷集时, 这一方法就失效了。为了使无穷集之间也能比“大小”, 通过函数定义集合的势 (Cardinality)。

定义 2.2.3 (集合的势 Cardinality). 设 X, Y 为集合,

1. X 与 Y 等势, 当且仅当, 存在 X 到 Y 的双射, 记为 $|X| = |Y|$;
2. Y 优势于 X , 当且仅当, 存在 X 到 Y 的单射, 记为 $|X| \leq |Y|$;
3. Y 严格优势于 X , 当且仅当, 存在 X 到 Y 的单射, 但不存在 X 到 Y 的双射, 记为 $|Y| < |X|$ 。

命题 2.2.1. 等势具有自反性、对称性和传递性:

1. 自反性: 对于任意集合 X , 有 $|X| = |X|$ 。
2. 对称性: 如果 $|X| = |Y|$, 则 $|Y| = |X|$ 。
3. 传递性: 如果 $|X| = |Y|$ 且 $|Y| = |Z|$, 则 $|X| = |Z|$ 。

命题 2.2.2. 优势关系具有自反性、反对称性和传递性：

1. 自反性：对于任意集合 X ，有 $|X| \leq |X|$ 。
2. 反对称性：如果 $|X| \leq |Y|$ 且 $|Y| \leq |X|$ ，则 $|X| = |Y|$ 。
3. 传递性：如果 $|X| \leq |Y|$ 且 $|Y| \leq |Z|$ ，则 $|X| \leq |Z|$ 。

定义 2.2.4 (有限集与无限集). 设 X 为集合，

1. 如果 X 与某个自然数 n 等势，则称 X 为**有限集 (Finite Set)**，记为 $|X| = n$ ；
2. 如果 X 为空集，则称 X 为**空集 (Empty Set)**，记为 $|X| = 0$ ；
3. 如果 X 既不是空集也不是有限集，则称 X 为**无限集 (Infinite Set)**。
4. 如果 X 与自然数集 \mathbb{N} 等势，则称 X 为**可数无限集 (Countably Infinite Set)**

例 2.2.1. 对于常见的数集， $\mathbb{N} \subset \mathbb{Z} \subset \mathbb{Q}$ 都是可数无限集， $|\mathbb{N}| = |\mathbb{Z}| = |\mathbb{Q}|$ ，因为可以找到双射函数

1. 设 $f: \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{Z}$ ，将 \mathbb{Z} 中的整数按如下方式排列：

$$0, 1, -1, 2, -2, 3, -3, \dots$$

这样就可以定义双射 $f(n)$ 为上述排列中第 n 个整数

2. 设 $g: \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{Q}$ ，将 \mathbb{Q} 中的有理数按如下方式排列：

$$0, 1, -1, \frac{1}{2}, -\frac{1}{2}, 2, -2, \frac{1}{3}, -\frac{1}{3}, \frac{2}{3}, -\frac{2}{3}, 3, -3, \dots$$

这样就可以定义双射 $g(n)$ 为上述排列中第 n 个有理数

实数集 \mathbb{R} 是不可数无限集， $|\mathbb{R}| > |\mathbb{N}|$ ，可以通过 *Cantor* 对角线论证法证明。

2.3 等价关系

定义 2.3.1 (等价关系 Equivalence Relation). 设 X 为非空集合, $R \subseteq X \times X$ 是 X 上的二元关系。称 R 为 X 上的等价关系, 当且仅当, 对任意 $x, y, z \in X$, R 满足:

1. 自反性 *Reflexivity*: $(x, x) \in R$
2. 对称性 *Symmetry*: 若 $(x, y) \in R$, 则 $(y, x) \in R$
3. 传递性 *Transitivity*: 若 $(x, y) \in R$ 且 $(y, z) \in R$, 则 $(x, z) \in R$

对于任意 $x, y \in X$, 若 $(x, y) \in R$, 则称 x 与 y 关于关系 R 等价, 记为 $x \sim y$ 。可以根据等价关系, 将集合划分为若干个互不相交的子集, 每个子集称为一个等价类。

注解

等价关系是一种特殊的二元关系, 需要满足自反性、对称性和传递性。

例 2.3.1. 定义在有限集 $X = \{1, 2, \dots, 8\}$ 上的关系 R :

$$R = \{(x, y) : x, y \in X \wedge x \equiv y \pmod{3}\}$$

$x \equiv y \pmod{3}$ 称为 x, y 模 3 相等, 不难验证该关系是自反的、对称的和传递的。其中 1、4、7 模 3 等于 1; 2、5、8 模 3 等于 2; 3、6 模 3 等于 0

定义 2.3.2 (等价类 Equivalence Class). 设 R 为集合 X 上的等价关系。对于任意 $x \in X$, 定义 x 的等价类为

$$[x]_R = \{y \in X : (x, y) \in R\}$$

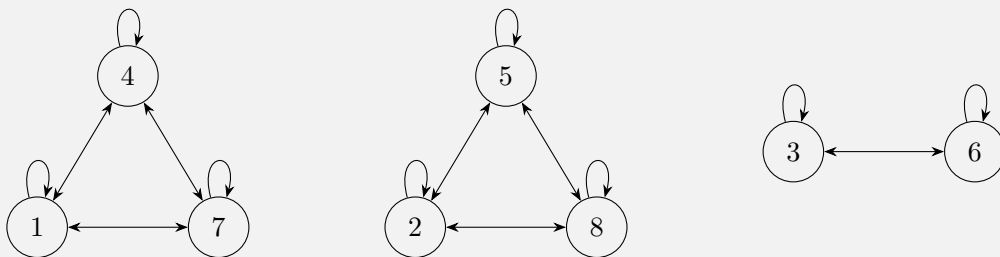
或简记为

$$[x] = \{y \in X : y \sim x\}$$

称 $[x]$ 为包含元素 x 的等价类。

注解

x 的等价类是 A 中所有与 x 等价的元素构成的集合。在例 2.3.1 中, 1 的等价类为 $[1] = \{1, 4, 7\}$; 2 的等价类为 $[2] = \{2, 5, 8\}$; 3 的等价类为 $[3] = \{3, 6\}$ 。这三个等价类, 互相没有交集, 用关系图表示为:



定义 2.3.3 (商集 Quotient Set). 设 R 为集合 X 上的等价关系。 X 关于 R 的商集定义为

$$X/R = \{[x] : x \in X\}$$

称 X/R 为集合 X 关于等价关系 R 的商集。

注解

在例 2.3.1 中, 商集为

$$X/R = \{[1], [2], [3]\} = \{\{1, 4, 7\}, \{2, 5, 8\}, \{3, 6\}\}$$

2.3.1 划分

定义 2.3.4 (划分 Partition). 设 X 为非空集合, \mathcal{P} 是 X 的幂集。子集族 $\mathcal{S} \subseteq \mathcal{P}$ 称为 X 的一个划分, 当且仅当, \mathcal{S} 满足:

1. 非空性 *Non-emptiness*: 对任意 $\emptyset \notin \mathcal{S}$
2. 覆盖性 *Coverage*: $\bigcup_{A \in \mathcal{S}} A = X$
3. 互斥性 *Mutual Exclusion*: 对任意 $A, B \in \mathcal{S}$, 若 $A \neq B$, 则 $A \cap B = \emptyset$

注解

划分中, 每一个元素都是一个非空子集, 这些子集是互不相交的, 且它们的并集为整个集合。商集是根据等价关系得到的对集合的划分, 不同的等价关系会得到不同的划分。

2.4 代数结构

定义 2.4.1 (代数运算 Algebraic Operation). 设 X 为集合, $n \in \mathbb{N}^+$, 函数 $f: X^n \rightarrow X$ 称为 X 上的 n 元运算, 当且仅当, f 满足:

1. 封闭性: $\text{dom} f = X^n$

特别地, 当 $n = 1$ 时, 称 f 为一元运算; 当 $n = 2$ 时, 称 f 为二元运算。二元运算常用符号 $*$, \circ , \cdot 等表示, $f(x, y)$ 简记为 $x * y$ 。

定义 2.4.2 (代数结构 Algebraic Structure). 设 X 为集合, O 为 X 上的运算集, 则二元组 (X, O) 称为代数结构。

定义 2.4.3 (子代数 Subalgebra). 设 (X, O) 为代数结构, $Y \subseteq X$ 。二元组 (Y, O) 称为代数结构 (X, O) 的子代数, 当且仅当, 对于任意 n 元运算 $f \in O$, 满足封闭性 $\text{dom} f = Y^n$ 。

注解

代数运算要求函数满足封闭性, 也即集合中任意 n 个元素经过运算后仍然属于该集合。代数结构是集合与运算的结合体, 在某些代数结构中存在特殊元素, 比如单位元、零元, 它们属于该代数系统的性质, 称为代数常数。集合、运算和代数常数是构成一个代数结构的三要素, 它们的性质是代数学研究的主要对象。子代数会从原始结构中继承相关的运算性质, 且含有相同的代数常数, 因此具有相同的代数结构。

2.4.1 代数常数

定义 2.4.4 (单位元 Identity Element). 设 $(X, *)$ 为代数结构。如果存在 $e_l \in X$, 当对任意 $x \in X$, 均有

$$e_l * x = x$$

时, 称 e_l 为 $(X, *)$ 的左单位元。如果存在 $e_r \in X$, 当对任意 $x \in X$, 均有

$$x * e_r = x$$

时, 称 e_r 为 $(X, *)$ 的右单位元。如果 $e_l = e_r$, 则称 e_l (或 e_r) 为 $(X, *)$ 的单位元, 记为 e 。

定义 2.4.5 (零元 Zero Element). 设 $(X, *)$ 为代数结构。如果存在 $z_l \in X$, 当对任意 $x \in X$, 均有

$$z_l * x = z_l$$

时, 称 z_l 为 $(X, *)$ 的左零元。如果存在 $z_r \in X$, 当对任意 $x \in X$, 均有

$$x * z_r = z_r$$

时, 称 z_r 为 $(X, *)$ 的右零元。如果 $z_l = z_r$, 则称 z_l (或 z_r) 为 $(X, *)$ 的零元, 记为 z 。

定义 2.4.6 (逆元 Inverse Element). 设 $(X, *)$ 为代数结构, e 为 $(X, *)$ 的单位元。如果对任意 $x \in X$, 均存在 $y \in X$, 使得

$$x * y = e$$

则称 y 为 x 关于运算 $*$ 的右逆元, 记为 x_r^{-1} 。如果对任意 $x \in X$, 均存在 $y \in X$, 使得

$$y * x = e$$

则称 y 为 x 关于运算 $*$ 的左逆元, 记为 x_l^{-1} 。如果对任意 $x \in X$, 均存在 $y \in X$, 使得

$$x * y = y * x = e$$

则称 y 为 x 关于运算 $*$ 的逆元, 记为 x^{-1} 。

定义 2.4.7 (反元 Additive Inverse). 设 $(X, +)$ 为代数结构, z 为 $(X, +)$ 的零元。如果对任意 $x \in X$, 均存在 $y \in X$, 使得

$$x + y = z$$

则称 y 为 x 关于加法的反元, 记为 $-x$ 。

2.4.2 代数算律

定义 2.4.8 (交换律 Commutative Law). 设 $(X, *)$ 为代数结构。如果对任意 $x, y \in X$, 均有

$$x * y = y * x$$

则称运算 $*$ 满足交换律。

定义 2.4.9 (结合律 Associative Law). 设 $(X, *)$ 为代数结构。如果对任意 $x, y, z \in X$, 均有

$$(x * y) * z = x * (y * z)$$

则称运算 $*$ 满足结合律。

定义 2.4.10 (分配律 Distributive Law). 设 $(X, +, \cdot)$ 为代数结构。如果对任意 $x, y, z \in X$, 均有

$$x \cdot (y + z) = x \cdot y + x \cdot z$$

则称运算 \cdot 对运算 $+$ 满足左分配律; 如果对任意 $x, y, z \in X$, 均有

$$(y + z) \cdot x = y \cdot x + z \cdot x$$

则称运算 \cdot 对运算 $+$ 满足右分配律; 如果运算 \cdot 对运算 $+$ 同时满足左、右分配律, 则称运算 \cdot 对运算 $+$ 满足分配律。

定义 2.4.11 (消去律 Cancellation Law). 设 $(X, *)$ 为代数结构。如果对任意 $a, b, c \in X$, $a \neq z$ 不是零元。当 $a * b = a * c$ 时, 必有 $b = c$, 则称运算 $*$ 满足左消去律; 如果对任意 $a, b, c \in X$, 当 $b * a = c * a$ 时, 必有 $b = c$, 则称运算 $*$ 满足右消去律; 如果运算 $*$ 同时满足左、右消去律, 则称运算 $*$ 满足消去律。

2.4.3 同态与同构

定义 2.4.12 (同态 Homomorphism). 设 $(X, *)$ 和 (Y, \circ) 为代数结构。如果映射 $f: X \rightarrow Y$ 满足对任意 $x_1, x_2 \in X$, 均有

$$f(x_1 * x_2) = f(x_1) \circ f(x_2)$$

则称映射 f 为从代数结构 $(X, *)$ 到代数结构 (Y, \circ) 的同态。另外,

1. 如果 f 是单射, 则称 f 为**单同态 Monomorphism**;
2. 如果 f 是满射, 则称 f 为**满同态 Epimorphism**;
3. 如果 f 是双射, 则称 f 为**同构 Isomorphism**。

注解

同态映射反应了两个同类型代数结构的“相似性”, 它可以将一个代数结构里的运算与另一个同类型代数结构的对应运算相关联。如果是同构映射, 那么这两个代数结构是等价的, 比如, 三维空间中全体有向箭头与三维实向量集合同构, 那么三维空间中有向箭头的相加和缩放可以归结为三维实向量的相加和数乘, 这是解析几何的重要基础。

2.4.4 群

定义 2.4.13 (半群 Semigroup). 设 $(G, *)$ 为代数结构。如果运算 $*$ 满足结合律, 则称 $(G, *)$ 为半群。也即, $(G, *)$ 是半群, 当且仅当, 二元运算 $*$ 满足:

1. 封闭性: 对任意 $a, b \in G$, 有 $a * b \in G$;
2. 结合律: 对任意 $a, b, c \in G$, 有 $(a * b) * c = a * (b * c)$ 。

定义 2.4.14 (幺半群 Monoid). 设 $(M, *)$ 为半群。如果存在单位元, 则称 $(M, *)$ 为幺半群。也即, $(M, *)$ 是幺半群, 当且仅当, 二元运算 $*$ 满足:

1. 封闭性: 对任意 $a, b \in M$, 有 $a * b \in M$;
2. 结合律: 对任意 $a, b, c \in M$, 有 $(a * b) * c = a * (b * c)$;
3. 存在单位元: 存在 $e \in M$, 使得对任意 $a \in M$, 有 $e * a = a * e = a$ 。

定义 2.4.15 (群 Group). 设 $(G, *)$ 为幺半群。如果每个元素均有逆元, 则称 $(G, *)$ 为群。也即, $(G, *)$ 是群, 当且仅当, 二元运算 $*$ 满足:

1. 封闭性: 对任意 $a, b \in G$, 有 $a * b \in G$;
2. 结合律: 对任意 $a, b, c \in G$, 有 $(a * b) * c = a * (b * c)$;
3. 存在单位元: 存在 $e \in G$, 使得对任意 $a \in G$, 有 $e * a = a * e = a$;
4. 存在逆元: 对任意 $a \in G$, 存在 $b \in G$, 使得 $a * b = b * a = e$ 。

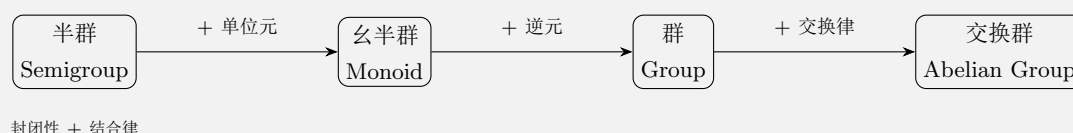
只含有单位元的群称为**平凡群 Trivial Group**, 记为 $\{e\}$; 反之, 含有除单位元外其他元素的群称为**非平凡群 Non-Trivial Group**。

定义 2.4.16 (阿贝尔群 Abelian Group). 设 $(G, *)$ 为群。如果运算 $*$ 满足交换律, 则称 $(G, *)$ 为阿贝尔群或交换群。也即, $(G, *)$ 是交换群, 当且仅当, 二元运算 $*$ 满足:

1. 封闭性: 对任意 $a, b \in G$, 有 $a * b \in G$;
2. 结合律: 对任意 $a, b, c \in G$, 有 $(a * b) * c = a * (b * c)$;
3. 存在单位元: 存在 $e \in G$, 使得对任意 $a \in G$, 有 $e * a = a * e = a$;
4. 存在逆元: 对任意 $a \in G$, 存在 $b \in G$, 使得 $a * b = b * a = e$;
5. 交换律: 对任意 $a, b \in G$, 有 $a * b = b * a$ 。

注解

用一幅图展示各种群之间的关系:



例 2.4.1. 正整数集上定义普通加法的代数结构 $(\mathbb{Z}^+, +)$ 是半群; 自然数集上定义普通加法的代数结构 $(\mathbb{N}, +)$ 是么半群; 整数集上定义普通加法的代数结构 $(\mathbb{Z}, +)$ 是群 (交换群), 称为整数加群。

2.4.5 环与域

定义 2.4.17 (环 Ring). 设 $(R, +, \cdot)$ 为代数结构。如果

1. $(R, +)$ 是交换群;
2. (R, \cdot) 是半群;
3. 乘法对加法满足分配律;

则称 $(R, +, \cdot)$ 为环。群 $(R, +)$ 中的单位元记为 0 , 称为加法零元。如果环只有一个元素, 则称为零环 **Zero Ring**, 记为 $\{0\}$; 反之, 含有两个及以上元素的环称为非零环 **Non-Zero Ring**。

定义 2.4.18 (无零因子环 Ring without Zero Divisors). 设 $(R, +, \cdot)$ 为环。如果对任意 $a, b \in R$, $a \neq 0$, $b \neq 0$, 均有 $a \cdot b \neq 0$, 则称环 $(R, +, \cdot)$ 为无零因子环。

定义 2.4.19 (含么环 Ring with identity). 设 $(R, +, \cdot)$ 为环。如果存在乘法单位元, 则称环 $(R, +, \cdot)$ 为含么环。也即 (R, \cdot) 是么半群, $(R, +, \cdot)$ 为含么环。其中, 乘法单位元记为 e 或 1 , 且 $e \neq 0$ 。

定义 2.4.20 (整环 Integral Domain). 设 $(R, +, \cdot)$ 为含么环。如果 $(R, +, \cdot)$ 是无零因子环, 则称 $(R, +, \cdot)$ 为整环。

定义 2.4.21 (交换环 Commutative Ring). 设 $(R, +, \cdot)$ 为环。如果乘法 \cdot 满足交换律, 则称 $(R, +, \cdot)$ 为交换环。

定义 2.4.22 (除环 Division Ring). 设 $(R, +, \cdot)$ 为含幺环。如果对任意 $a \in R, a \neq 0$, 均存在 $a^{-1} \in R$, 使得 $a \cdot a^{-1} = a^{-1} \cdot a = e$, 则称 $(R, +, \cdot)$ 为除环。也即 $(R - \{0\}, \cdot)$ 是群, $(R, +, \cdot)$ 为含幺环。

例 2.4.2. 常见的环有: 整数环 $(\mathbb{Z}, +, \cdot)$ 是含幺交换环和整环, 但不是除环, 因为除法不封闭; 多项式环 $(P[x], +, \cdot)$ 是含幺交换环和整环, 但不是除环, 因为除法不封闭; 矩阵环 $(M_n(\mathbb{R}), +, \cdot)$ 是含幺环, 但不是交换环, 因为矩阵乘法不满足交换律, 也不是整环, 因为存在零因子 (非零矩阵相乘可能得零矩阵), 但它是除环当且仅当 $n = 1$; 四元数环 $(\mathbb{H}, +, \cdot)$ 是含幺环和除环, 但不是交换环, 因为四元数乘法不满足交换律。

定义 2.4.23 (域 Field). 设 $(F, +, \cdot)$ 为代数结构。如果

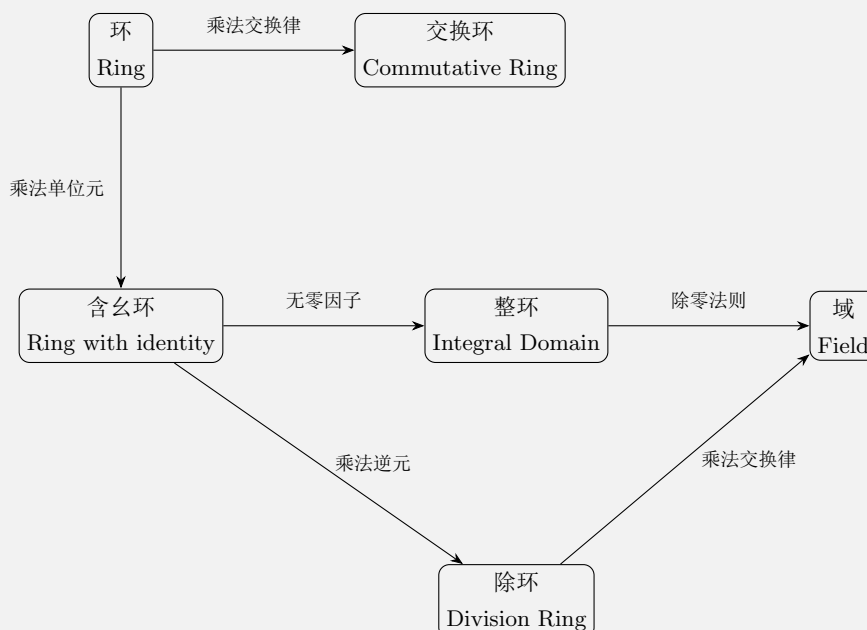
1. $(F, +)$ 是交换群;
2. (F, \cdot) 是交换群;
3. 乘法对加法满足分配律;
4. 除零法则: 对任意 $a \in F, a \neq 0$, 存在 $b \in F$, 使得 $a \cdot b = 1$ 。

则称 $(F, +, \cdot)$ 为域。也即, 域 $(F, +, \cdot)$ 是含幺交换环且是除环。

例 2.4.3. 常见的域有: 有理数域 $(\mathbb{Q}, +, \cdot)$ 、实数域 $(\mathbb{R}, +, \cdot)$ 和复数域 $(\mathbb{C}, +, \cdot)$

注解

用一幅图展示各种环之间的关系:



2.4.6 模与线性空间

定义 2.4.24 (模 Module). 设 $(R, +, \cdot)$ 为含么环, $(G, +)$ 为阿贝尔群。如果存在一个标量乘法 $*$: $R \times G \rightarrow G$, 满足以下条件:

1. 对任意 $r, s \in R, g \in G$, 有 $(r + s) * g = r * g + s * g$;
2. 对任意 $r \in R, g, h \in G$, 有 $r * (g + h) = r * g + r * h$;
3. 对任意 $r, s \in R, g \in G$, 有 $(r * s) * g = r * (s * g)$;
4. 对任意 $g \in G$, 有 $1 * g = g$ 。

则称 $(G, +)$ 为**左 R -模**。如果存在一个标量乘法 $*$: $G \times R \rightarrow G$, 满足以下条件:

1. 对任意 $r, s \in R, g \in G$, 有 $g * (r + s) = g * r + g * s$;
2. 对任意 $r \in R, g, h \in G$, 有 $(g + h) * r = g * r + h * r$;
3. 对任意 $r, s \in R, g \in G$, 有 $g * (r * s) = (g * r) * s$;
4. 对任意 $g \in G$, 有 $g * 1 = g$ 。

则称 $(G, +)$ 为**右 R -模**。如果 $(R, +, \cdot)$ 是含么交换环, 左、右 R -模没有区别, 对任意 $r \in R, g \in G$, 均有 $r * g = g * r$, 则称 $(G, +)$ 为**双边 R -模**, 或 **R -模**。

定义 2.4.25 (线性空间 Linear Space). 设 $(F, +, \cdot)$ 为域, $(V, +)$ 为阿贝尔群。如果存在一个标量乘法 \cdot : $F \times V \rightarrow V$, 满足以下条件:

1. 对任意 $r, s \in F, \mathbf{v} \in V$, 有 $(r + s) \cdot \mathbf{v} = r \cdot \mathbf{v} + s \cdot \mathbf{v}$;
2. 对任意 $r \in F, \mathbf{u}, \mathbf{v} \in V$, 有 $r \cdot (\mathbf{u} + \mathbf{v}) = r \cdot \mathbf{u} + r \cdot \mathbf{v}$;
3. 对任意 $r, s \in F, \mathbf{v} \in V$, 有 $(r \cdot s) \cdot \mathbf{v} = r \cdot (s \cdot \mathbf{v})$;
4. 对任意 $\mathbf{v} \in V$, 有 $1 \cdot \mathbf{v} = \mathbf{v}$ 。

则称 $(V, +, \cdot)$ 为 **F -线性空间**, 或**向量空间 Vector Space**。 V 中的元素称为**向量 Vector**, F 中的元素称为**标量 Scalar**。

注解

线性空间是模的特例, 线性空间是定义在域上的模, 而模是定义在环上的。线性空间是非常重要的代数结构, 是线性代数研究的对象。线性空间中“空间”二字, 强调了线性空间的几何意义, 解析几何中常用向量表示空间中的点、线、面等几何对象。在线性空间上定义度量结构后, 称为赋范线性空间, 是泛函分析的研究对象。可以说线性空间是现代数学的基础。

2.5 序结构

定义 2.5.1 (偏序关系 Partial Order Relation). 设 R 为非空集合 X 上的二元关系。称 R 为 X 上的偏序关系, 当且仅当, R 满足: 对 $x, y, z \in X$

1. 自反性 (Reflexivity): $(x, x) \in R$;
2. 反对称性 (Antisymmetry): 若 $(x, y) \in R$ 且 $(y, x) \in R$, 则 $x = y$;
3. 传递性 (Transitivity): 若 $(x, y) \in R$ 且 $(y, z) \in R$, 则 $(x, z) \in R$ 。

偏序关系常用符号 \preceq 表示, $(x, y) \in R$ 简记为 $x \preceq y$ 。二元组 (X, \preceq) 称为偏序集。

定义 2.5.2 (严格偏序关系 Strict Partial Order Relation). 设 R 为非空集合 X 上的二元关系。称 R 为 X 上的严格偏序关系, 当且仅当, R 满足: 对 $x, y, z \in X$

1. 反自反性 (Irreflexivity): $(x, x) \notin R$;
2. 反对称性 (Antisymmetry): 若 $(x, y) \in R$ 且 $(y, x) \in R$, 则 $x = y$;
3. 传递性 (Transitivity): 若 $(x, y) \in R$ 且 $(y, z) \in R$, 则 $(x, z) \in R$ 。

严格偏序关系常用符号 \prec 表示, $(x, y) \in R$ 简记为 $x \prec y$ 。

定义 2.5.3 (全序关系 Total Order Relation). 设 \preceq 为非空集合 X 上的偏序关系。称 \preceq 为 X 上的全序关系, 当且仅当, \preceq 满足:

1. 全序性 (Totality): 对任意 $x, y \in X$, 要么 $x \preceq y$, 要么 $y \preceq x$ 。

全序关系也称为线序关系, 全序关系常用符号 \leq 表示, 二元组 (X, \leq) 称为全序集或线序集。

注解

在集合论中, 集合中的元素是没有顺序的概念的, 当定义了集合中元素之间的某种顺序关系后, 集合才具有了序结构。如果是全序关系, 那么这个集合中任意两个元素都是可比的。序关系强调集合元素之间的可比性, 如果集合中的元素是也是一些集合, 那么集合之间的包含关系是一种偏序关系, 集合之间的优势关系也是一种偏序关系。

2.5.1 上下界

定义 2.5.4 (上界 Upper Bound). 设 (X, \preceq) 为偏序集, $Y \subseteq X$ 。若存在 $b \in X$, 使得对任意 $y \in Y$, 均有 $y \preceq b$, 则称 b 为子集 Y 的上界。

定义 2.5.5 (下界 Lower Bound). 设 (X, \preceq) 为偏序集, $Y \subseteq X$ 。若存在 $a \in X$, 使得对任意 $y \in Y$, 均有 $a \preceq y$, 则称 a 为子集 Y 的下界。

注解

如果子集 Y 存在上界（下界），但不唯一，且不一定属于子集 Y ；如果 Y 没有上界（下界），则称 Y 无界。

定义 2.5.6 (下确界 Infimum). 设 (X, \preceq) 为偏序集, $Y \subseteq X$ 。若 Y 存在下界, 且存在 $i \in X$, 使得对任意 $y \in Y$, 均有 $i \preceq y$, 且对任意 $a \in X$, 若 $a \preceq y$, 则有 $a \preceq i$, 则称 i 为子集 Y 的下确界, 记为 $i = \inf Y$ 。

定义 2.5.7 (上确界 Supremum). 设 (X, \preceq) 为偏序集, $Y \subseteq X$ 。若 Y 存在上界, 且存在 $s \in X$, 使得对任意 $y \in Y$, 均有 $y \preceq s$, 且对任意 $b \in X$, 若 $y \preceq b$, 则有 $s \preceq b$, 则称 s 为子集 Y 的上确界, 记为 $s = \sup Y$ 。

注解

如果 Y 存在上界, 那么上确界是所有上界中最小的一个; 如果 Y 存在下界, 那么下确界是所有下界中最大的一个。

定理 2.5.1 (确界唯一性). 设 (X, \preceq) 为偏序集, $Y \subseteq X$ 。若 Y 存在上确界（下确界），则上确界（下确界）唯一。

证明. 假设 $s_1, s_2 \in X$ 均为子集 Y 的上确界, 且 $s_1 \neq s_2$ 。由上确界定义可知, 对任意 $y \in Y$, 均有 $y \preceq s_1$ 且 $y \preceq s_2$, 且对任意 $b \in X$, 若 $y \preceq b$, 则有 $s_1 \preceq b$ 且 $s_2 \preceq b$ 。取 $b = s_2$, 则有 $s_1 \preceq s_2$; 取 $b = s_1$, 则有 $s_2 \preceq s_1$ 。由反对称性可知, $s_1 = s_2$, 与假设矛盾, 因此上确界唯一。下确界唯一的证明类似。 \square

定义 2.5.8 (最小元 Minimal Element). 设 (X, \preceq) 为偏序集, $Y \subseteq X$ 。若存在 $m \in Y$, 使得对任意 $y \in Y$, 均有 $m \preceq y$, 则称 m 为子集 Y 的最小元。

定义 2.5.9 (最大元 Maximal Element). 设 (X, \preceq) 为偏序集, $Y \subseteq X$ 。若存在 $M \in Y$, 使得对任意 $y \in Y$, 均有 $y \preceq M$, 则称 M 为子集 Y 的最大元。

2.6 拓扑结构

定义 2.6.1 (拓扑空间 Topological Space). 设 X 是一个集合, $\mathcal{T}(X) \subseteq \mathcal{P}(X)$ 是 X 的子集族, 二元组 $(X, \mathcal{T}(X))$ 称为拓扑空间, 当且仅当, $\mathcal{T}(X)$ 满足:

1. 空集与全集: $\emptyset \in \mathcal{T}(X)$ 且 $X \in \mathcal{T}(X)$;
2. 对任意并封闭: 任意 $\{U_i : i \in I\} \subseteq \mathcal{T}(X)$, 有 $\bigcup_{i \in I} U_i \in \mathcal{T}(X)$;
3. 对有限交封闭: 有限个 $U_1, U_2, \dots, U_n \in \mathcal{T}(X)$, 有 $U_1 \cap U_2 \cap \dots \cap U_n \in \mathcal{T}(X)$ 。

子集族 $\mathcal{T}(X)$ 称为 X 上的**拓扑 Topology**, $\mathcal{T}(X)$ 中的元素称为**开集 Open Set**。

注解

根据拓扑空间的定义, 幂集 $\mathcal{P}(X)$ 和 $\{\emptyset, X\}$ 都是 X 上的拓扑, 分别称为**离散拓扑 Discrete Topology**和**平凡拓扑 Trivial Topology**。给定集合 X , X 的任意子集族并非都是 X 上的拓扑, X 的拓扑也非唯一。比如, 设 $X = \{a, b, c\}$, 那么下面的子集族都是 X 上的拓扑:

$$\begin{aligned}\mathcal{T}_1(X) &= \{\emptyset, X\}, \\ \mathcal{T}_2(X) &= \mathcal{P}(X), \\ \mathcal{T}_3(X) &= \{\emptyset, X, \{a\}\}, \\ \mathcal{T}_4(X) &= \{\emptyset, X, \{a, b\}\}, \\ \mathcal{T}_5(X) &= \{\emptyset, X, \{a\}, \{a, b\}\}, \\ \mathcal{T}_6(X) &= \{\emptyset, X, \{a, b\}, \{b\}, \{b, c\}\}.\end{aligned}$$

下面的子集族不是 X 上的拓扑:

$$\begin{aligned}\mathcal{T}_7(X) &= \{\emptyset, X, \{a\}, \{b\}\}, \\ \mathcal{T}_8(X) &= \{\emptyset, X, \{a, b\}, \{b, c\}\}.\end{aligned}$$

定义 2.6.2 (闭集 Closed Set). 设 $(X, \mathcal{T}(X))$ 为拓扑空间, 称 $A \subseteq X$ 为闭集, 当且仅当, $\mathbb{C}_X A \in \mathcal{T}(X)$ 。

命题 2.6.1 (闭集的性质). 设 $(X, \mathcal{T}(X))$ 为拓扑空间, 则有:

1. 空集与全集: \emptyset 与 X 是闭集;
2. 对任意交封闭: $\bigcap_{i \in I} A_i$ 是闭集, 其中 $\{A_i : i \in I\}$ 是闭集;
3. 对有限并封闭: $A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_n$ 是闭集, 其中 A_1, A_2, \dots, A_n 是闭集。

注解

闭集是对几何空间中闭区间、闭球等概念的抽象。闭集与开集的关系是互补的, 即一个集合是闭集, 当且仅当它的补集是开集。拓扑空间中的闭集可以用来定义点的极限、闭包等概念。

2.6.1 连续函数

定义 2.6.3 (连续函数 Continuous Function). 设 $(X, \mathcal{T}(X))$ 和 $(Y, \mathcal{T}(Y))$ 是拓扑空间, 映射 $f: X \rightarrow Y$ 称为连续函数, 当且仅当, $\forall V \in \mathcal{T}(Y)$, 有 $f^{-1}(V) \in \mathcal{T}(X)$ 。

定义 2.6.4 (同胚 Homeomorphism). 设 $(X, \mathcal{T}(X))$ 和 $(Y, \mathcal{T}(Y))$ 是拓扑空间, 映射 $f: X \rightarrow Y$ 称为同胚, 当且仅当, f 是双射且 f 与 f^{-1} 都是连续函数, 记为 $X \cong Y$ 。

注解

连续函数是对几何空间中连续变化概念的抽象。连续函数保持了拓扑结构, 即开集的原像仍然是开集。同胚是拓扑空间之间的一种等价关系, 表示两个拓扑空间在拓扑意义下是相同的。拓扑空间的同胚类似于代数结构的同构。

2.6.2 度量空间

定义 2.6.5 (度量空间 Metric Space). 设 X 是一个非空集合, 映射 $d: X \times X \rightarrow \mathbb{R}$ 称为度量, 当且仅当, $\forall x, y, z \in X$, 有:

1. 非负性: $d(x, y) \geq 0$, 且当且仅当 $x = y$ 时取等号;
2. 对称性: $d(x, y) = d(y, x)$;
3. 三角不等式: $d(x, z) \leq d(x, y) + d(y, z)$ 。

二元组 (X, d) 称为度量空间, 函数 d 称为 X 上的度量。

定义 2.6.6 (开球 Open Ball). 设 (X, d) 为度量空间, $x \in X$ 且 $r > 0$, 集合 $B(x, r) = \{y \in X : d(x, y) < r\}$ 称为以 x 为中心、 r 为半径的开球。

命题 2.6.2 (度量空间诱导的拓扑). 设 (X, d) 为度量空间, 定义 $\mathcal{T}(X) = \{U \subseteq X : \forall x \in U, \exists r > 0, B(x, r) \subseteq U\}$, 则 $(X, \mathcal{T}(X))$ 为拓扑空间。

例 2.6.1. 实数集 \mathbb{R} 和绝对值距离 $d(x, y) = |x - y|$ 构成一个度量空间, 其中,

1. 任意开区间 (a, b) 是开集; $(a, +\infty)$ 和 $(-\infty, b)$ 也是开集;
2. 任意闭区间 $[a, b]$ 是闭集, 它是开区间 $(-\infty, b) \cap (a, +\infty)$ 的补集; 有限集也是闭集;
3. \mathbb{R} 和 \emptyset 既是开集也是闭集
4. 任意半开半闭区间 $[a, b)$ 和 $(a, b]$ 既不是开集也不是闭集。

注解

度量空间是对几何空间中距离概念的抽象。度量函数 d 用来衡量集合中任意两个元素之间的距离。常见的度量包括欧氏距离、曼哈顿距离和切比雪夫距离等。度量空间可以诱导出拓扑结构, 开球的集合构成了 X 上的一个拓扑, 称为由度量 d 诱导的拓扑。

Chapter 3

数系的扩充

在第一章中，利用无穷公理定义了自然数 1.2.12，根据集合的包含关系，定义了自然数的序 1.2.13， (\mathbb{N}, \leq) 是一个全序集。然后利用替代公理模式，定义了自然数的加法 1.2.14 和乘法 1.2.15， $(\mathbb{N}, +)$ 和 (\mathbb{N}, \times) 都是是一个交换幺半群；乘法对加法分配， $(\mathbb{N}, +, \times)$ 是一个含幺交换半环。在本章中，将介绍如何从自然数出发，扩充出整数、有理数、实数等数系。数系的每一次扩充，都希望它能使更多的运算封闭，并且已有的运算性质能“向下兼容”。

定义 3.0.1 (等于关系 Equality Relation). R 为集合 X 上的一个等价关系。称 R 为 X 上的等于关系，当且仅当， R 满足：

1. 替代性：对于任意 $(x, y) \in R$ ，对于一切函数 $f: X \rightarrow X$ ，均有 $(f(x), f(y)) \in R$

记 $(x, y) \in R$ 为 $x = y$ 。

注解

等于关系是更严格的等价关系。满足替代性说明，集合中等价的两元素，经过任意函数映射后的像也是等价的。在定义新的数系的时候，不仅需要验证新的运算是否对集合封闭，还需要给出一个等于关系。

3.1 整数

定义 3.1.1 (整数 Integer). 有序对 $(a, b) \in \mathbb{N}^2$ 记为 $a - b$ ，其中，

1. 等于关系： $a - b = c - d \iff a + d = b + c$
2. 等价类：任意 $a - b \in \mathbb{N}^2$ 的等价类为

$$[a - b]_{=} = \{(c, d) \in \mathbb{N}^2 : a + d = b + c\}$$

称 \mathbb{N}^2 关于 $=$ 关系的商集 $\mathbb{N}^2 /_{=} = \{[a - b]_{=} : a - b \in \mathbb{N}^2\} =$ 为整数集，记为 \mathbb{Z} 。整数集中的元素称为整数。

注解

在 $a - b$ 中, $-$ 不是减号, 而是一个符号, 此时还没有定义减法, 仅表示这是一个有序对 (a, b) 。整数也不是有序对, 而是有序对关于等于关系的等价类, 比如, $3 - 5$ 和 $1 - 3$ 是不同的有序对, 但它们属于同一个等价类 $[3 - 5]_{=} = [1 - 3]_{=}$, 表示同一个整数。全体自然数可以嵌入到整数集中, 即 $\forall n \in \mathbb{N}$, 有 $n = [n - 0]_{=} \in \mathbb{Z}$ 。例如, $0 = [0 - 0]_{=}$, $1 = [1 - 0]_{=}$, $2 = [2 - 0]_{=}$, $3 = [3 - 0]_{=}$, \dots 。 $\mathbb{C}_{\mathbb{Z}}\mathbb{N}$ 中的元素称为负整数。

定义 3.1.2 (整数的加法 Addition of Integers). 设 $[a - b]_{=}, [c - d]_{=} \in \mathbb{Z}$, 定义加法为

$$[a - b]_{=} + [c - d]_{=} = [(a + c) - (b + d)]_{=}$$

定义 3.1.3 (整数的乘法 Multiplication of Integers). 设 $[a - b]_{=}, [c - d]_{=} \in \mathbb{Z}$, 定义乘法为

$$[a - b]_{=} \cdot [c - d]_{=} = [(ac + bd) - (ad + bc)]_{=}$$

注解

整数的加法和乘法都是良定义 (Well-defined) 的, 即不依赖于代表元的选取, 而且是封闭的。证明略。自然数的加法和乘法在整数集中保持不变。例如, $[2 - 0]_{=} + [3 - 0]_{=} = [(2 + 3) - (0 + 0)]_{=} = [5 - 0]_{=}$, 即 $2 + 3 = 5$ 。

定义 3.1.4 (整数加法的逆元 Additive Inverse of Integers). 设 $[a - b]_{=} \in \mathbb{Z}$, 定义其加法逆元为

$$-[a - b]_{=} = [b - a]_{=}$$

使得, $[a - b]_{=} + [-[a - b]_{=}] = [0 - 0]_{=}$ 。

定义 3.1.5 (整数的减法 Subtraction of Integers). 设 $[a - b]_{=}, [c - d]_{=} \in \mathbb{Z}$, 定义减法为

$$[a - b]_{=} - [c - d]_{=} = [a - b]_{=} + (-[c - d]_{=}) = [(a + d) - (b + c)]_{=}$$

注解

可以证明, 任何一个整数都有唯一的加法逆元。因此, 整数的减法也是良定义的, 即不依赖于代表元的选取, 而且是封闭的。自然数集中, 不存在加法逆元, 因此也不存在减法。整数集相比自然数集, 扩充了加法逆元, 使得加法和减法都能良定义。

定理 3.1.1 (整数代数运算的性质). 设 $x, y, z \in \mathbb{Z}$, 则

1. 交换律: $x + y = y + x$, $xy = yx$
2. 结合律: $(x + y) + z = x + (y + z)$, $(xy)z = x(yz)$
3. 分配律: $x(y + z) = xy + xz$
4. 存在加法单位元 0, 使得 $\forall x \in \mathbb{Z}$, 有 $x + 0 = 0 + x = x$

5. 存在乘法单位元 1, 使得 $\forall x \in \mathbb{Z}$, 有 $x \cdot 1 = 1 \cdot x = x$
6. 存在加法逆元 $-x$, 使得 $\forall x \in \mathbb{Z}$, 有 $x + (-x) = (-x) + x = 0$
7. 乘法对加法的零因子: $\forall x, y \in \mathbb{Z}$, 若 $xy = 0$, 则 $x = 0$ 或 $y = 0$

定义 3.1.6 (整数的序关系 Order Relation on Integers). 设 $[a - b]_=, [c - d]_= \in \mathbb{Z}$, 定义序关系为

$$[a - b]_= \leq [c - d]_= \iff a + d \leq b + c$$

定义 3.1.7 (整数的绝对值 Absolute Value of Integers). 设 $[a - b]_= \in \mathbb{Z}$, 定义其绝对值为

$$|[a - b]_=| = \begin{cases} [a - b]_= & a \geq b \\ -[a - b]_= & a < b \end{cases}$$

定义 3.1.8 (整数的绝对值距离 Distance of Absolute Value of Integers). 设 $x, y \in \mathbb{Z}$, 定义它们的绝对值距离为

$$d(x, y) = |x - y|$$

定理 3.1.2 (整数绝对值的性质 Properties of Absolute Value of Integers). 设 $x, y \in \mathbb{Z}$, 则

1. 非负性: $|x| \geq 0$, 且 $|x| = 0 \iff x = 0$
2. 积的绝对值: $|xy| = |x||y|$
3. 三角不等式: $|x + y| \leq |x| + |y|$
4. 反三角不等式: $||x| - |y|| \leq |x - y|$
5. 距离的非负性: $d(x, y) \geq 0$, 且 $d(x, y) = 0 \iff x = y$
6. 距离的三角不等式: $d(x, z) \leq d(x, y) + d(y, z)$
7. 距离的对称性: $d(x, y) = d(y, x)$

注解

三元组 $(\mathbb{Z}, +, \cdot)$ 是一个交换整环。二元组 (\mathbb{Z}, \leq) 是一个全序集。二元组 (\mathbb{Z}, d) 是一个度量空间。

3.2 有理数

定义 3.2.1 (有理数 Rational Number). 有序对 $(a, b) \in \mathbb{Z}^2$ 记为 a/b , 其中,

1. 约定 $b \neq 0$ 。
2. 等于关系: $a/b = c/d \iff ad = bc$
3. 等价类: 任意 $a/b \in \mathbb{Z}^2$ 的等价类为

$$[a/b]_{=} = \{(c, d) \in \mathbb{Z}^2 : ad = bc\}$$

称 \mathbb{Z}^2 关于 $=$ 关系的商集 $\mathbb{Z}^2/_= = \{[a/b]_{=} : a/b \in \mathbb{Z}^2\}$ 为有理数集, 记为 \mathbb{Q} 。有理数集中的元素称为有理数。

注解

在 a/b 中, $/$ 不是除号, 而是一个符号, 此时还没有定义除法, 仅表示这是一个有序对 (a, b) 。有理数也不是有序对, 而是有序对关于等于关系的等价类, 比如, $1/2$ 和 $2/4$ 是不同的有序对, 但它们属于同一个等价类 $[1/2]_{=} = [2/4]_{=}$, 表示同一个有理数。全体整数可以嵌入到有理数集中, 即 $\forall n \in \mathbb{Z}$, 有 $n = [n/1]_{=} \in \mathbb{Q}$ 。例如, $0 = [0/1]_{=}$, $1 = [1/1]_{=}$, $2 = [2/1]_{=}$, $3 = [3/1]_{=}$, \dots 。 $\mathbb{C}_{\mathbb{Q}}\mathbb{Z}$ 中的元素称为真分数。

注解

有序对中要求第二个元素不为零, 即 $b \neq 0$, 这是因为如果 $b = 0$, 则等于关系将变得不合理, 比如, $1/0 = 2/0$ 将导致 $1 \cdot 0 = 2 \cdot 0$, 即 $0 = 0$, 这对任何 $a/0$ 和 $c/0$ 都成立, 违背了等于关系的自反性, 从而使得所有形如 $a/0$ 的有序对都属于同一个等价类, 我们不希望这样的情况出现。

定义 3.2.2 (有理数的加法 Addition of Rational Numbers). 设 $[a/b]_{=}, [c/d]_{=} \in \mathbb{Q}$, 定义加法为

$$[a/b]_{=} + [c/d]_{=} = [(ad + bc)/(bd)]_{=}$$

定义 3.2.3 (有理数的乘法 Multiplication of Rational Numbers). 设 $[a/b]_{=}, [c/d]_{=} \in \mathbb{Q}$, 定义乘法为

$$[a/b]_{=} \cdot [c/d]_{=} = [(ac)/(bd)]_{=}$$

定义 3.2.4 (有理数的加法逆元 Additive Inverse of Rational Numbers). 设 $[a/b]_{=} \in \mathbb{Q}$, 定义其加法逆元为

$$-[a/b]_{=} = [-a/b]_{=}$$

使得, $[a/b]_{=} + -[a/b]_{=} = [0/b^2]_{=}$ 。

定义 3.2.5 (有理数的减法 Subtraction of Rational Numbers). 设 $[a/b]_{=}, [c/d]_{=} \in \mathbb{Q}$, 定义减法为

$$[a/b]_{=} - [c/d]_{=} = [a/b]_{=} + (-[c/d]_{=}) = [(ad - bc)/(bd)]_{=}$$

注解

有理数的加法、减法和乘法都是良定义（Well-defined）的，即不依赖于代表元的选取，而且是封闭的。证明略。整数的加法和乘法在有理数集中保持不变。例如， $[2/1]_{=} + [3/1]_{=} = [(2 \cdot 1 + 3 \cdot 1)/(1 \cdot 1)]_{=} = [5/1]_{=}$ ，即 $2 + 3 = 5$ 。

定义 3.2.6 (有理数的乘法逆元 Multiplicative Inverse of Rational Numbers). 设 $[a/b]_{=} \in \mathbb{Q}$ ，且 $a \neq 0$ ，定义其乘法逆元为

$$[a/b]_{=}^{-1} = [b/a]_{=}$$

使得， $[a/b]_{=} \cdot [a/b]_{=}^{-1} = [ab/ab]_{=} = [1/1]_{=}$ 。

定义 3.2.7 (有理数的除法 Division of Rational Numbers). 设 $[a/b]_{=}, [c/d]_{=} \in \mathbb{Q}$ ，且 $c \neq [0/1]_{=}$ ，定义除法为

$$[a/b]_{=} / [c/d]_{=} = [a/b]_{=} \cdot [c/d]_{=}^{-1} = [(ad)/(bc)]_{=}$$

注解

可以证明，任何一个非零有理数都有唯一的乘法逆元。因此，有理数的除法也是良定义的，即不依赖于代表元的选取，而且是封闭的。整数集中，不存在乘法逆元，因此也不存在除法。相比整数集，有理数集扩充了乘法逆元，使得加法、减法、乘法和除法都能良定义。

定理 3.2.1 (有理数代数运算的性质). 设 $x, y, z \in \mathbb{Z}$ ，则

1. 交换律: $x + y = y + x$, $xy = yx$
2. 结合律: $(x + y) + z = x + (y + z)$, $(xy)z = x(yz)$
3. 分配律: $x(y + z) = xy + xz$
4. 加法的单位元: 存在唯一的 $0 \in \mathbb{Q}$ ，使得 $\forall x \in \mathbb{Q}$ ，有 $x + [0/1]_{=} = x$
5. 乘法的单位元: 存在唯一的 $1 \in \mathbb{Q}$ ，使得 $\forall x \in \mathbb{Q}$ ，有 $x \cdot [1/1]_{=} = x$
6. 乘法对加法的零因子: $\forall x, y \in \mathbb{Q}$ ，若 $xy = [0/1]_{=}$ ，则 $x = [0/1]_{=}$ 或 $y = [0/1]_{=}$
7. 加法的逆元: $\forall x \in \mathbb{Q}$ ，存在唯一的 $-x \in \mathbb{Q}$ ，使得 $x + (-x) = [0/1]_{=}$
8. 乘法的逆元: $\forall x \in \mathbb{Q}, x \neq [0/1]_{=}$ ，存在唯一的 $x^{-1} \in \mathbb{Q}$ ，使得 $x \cdot x^{-1} = [1/1]_{=}$

注解

三元组 $(\mathbb{Q}, +, \cdot)$ 构成一个有理数域。

定义 3.2.8 (有理数的序关系 Order Relation of Rational Numbers). 设 $[a/b]_{=}, [c/d]_{=} \in \mathbb{Q}$ ，为了避免符号歧义，约定 $b > 0, d > 0$ ，定义序关系为：

$$[a/b]_{=} \leq [c/d]_{=} \iff ad \leq bc$$

定义 3.2.9 (有理数的绝对值 Absolute Value of Rational Numbers). 设 $[a/b]_{=} \in \mathbb{Q}$, 定义其绝对值为

$$|[a/b]_{=}| = \begin{cases} [a/b]_{=}, & a/b \geq [0/1]_{=} \\ -[a/b]_{=}, & a/b < [0/1]_{=} \end{cases}$$

定义 3.2.10 (有理数的距离 Distance of Rational Numbers). 设 $[a/b]_{=}, [c/d]_{=} \in \mathbb{Q}$, 定义它们之间的距离为

$$d([a/b]_{=}, [c/d]_{=}) = |[a/b]_{=} - [c/d]_{=}|$$

定理 3.2.2 (有理数绝对值的性质). 设 $x, y \in \mathbb{Q}$, 则

1. 非负性: $|x| \geq [0/1]_{=}$, 且 $|x| = [0/1]_{=} \iff x = [0/1]_{=}$
2. 乘积的绝对值: $|xy| = |x||y|$
3. 幂的绝对值: $|x^n| = |x|^n$, $n \in \mathbb{Z}$
4. 商的绝对值: $|x/y| = |x|/|y|$, $y \neq [0/1]_{=}$
5. 三角不等式: $|x + y| \leq |x| + |y|$
6. 反三角不等式: $||x| - |y|| \leq |x - y|$
7. 距离的非负性: $d(x, y) \geq [0/1]_{=}$, 且 $d(x, y) = [0/1]_{=} \iff x = y$
8. 距离的三角不等式: $d(x, z) \leq d(x, y) + d(y, z)$
9. 距离的对称性: $d(x, y) = d(y, x)$

注解

二元组 (\mathbb{Q}, \leq) 是一个全序集, 二元组 (\mathbb{Q}, d) 是一个度量空间。

命题 3.2.1 (有理数的稠密性 Density of Rational Numbers). 设 $x, y \in \mathbb{Q}$, 且 $x < y$, 则存在 $z \in \mathbb{Q}$, 使得 $x < z < y$ 。例如, 取 $z = (x + y)/2$ 。

注解

有理数的稠密性说明任意两个有理数之间, 都有无数个有理数。尽管有理数是稠密的, 但在有理数之间依然存在无限多的“空隙”, 比如, 在 1 和 2 之间, 不存在有理数 x 使得 $x^2 = 2$, 因此有理数集存在“空隙”, 是“不连续的”。

3.3 实数

从自然数到有理数的扩充都非常的自然，然而有理数并不能满足我们的所有需求。比如在上一节的末尾介绍有理数稠密性时提到，不存在有理数 x 使得 $x^2 = 2$ 。为了满足这样的需求，我们需要对数系进行进一步的扩充，得到实数系。

例 3.3.1. 通过迭代法，我们可以找到一个有理数序列 a_n ，使得 $(a_n)^2$ 趋近于 2：

$$a_{n+1} = \frac{1}{2}(a_n + \frac{2}{a_n}), n \geq 0 \quad (3.1)$$

令 $a_0 = 1$ ，得到一个有理数序列：

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{1}{2}(1 + 2) = \frac{3}{2} = 1.5 \\ a_2 &= \frac{1}{2}(\frac{3}{2} + \frac{4}{3}) = \frac{17}{12} = 1.416666666666 \dots \\ a_3 &= \frac{1}{2}(\frac{17}{12} + \frac{24}{17}) = \frac{577}{408} = 1.414215686274 \dots \\ a_4 &= \frac{1}{2}(\frac{577}{408} + \frac{816}{577}) = \frac{665857}{470832} = 1.414213562374 \dots \\ &\vdots \end{aligned}$$

无限递归执行下去，会得到一个有理数的数列。随着 n 的增大， a_n 之间的间隔会越来越小。换一个首项，令 $a'_0 = 1.4$ ，同样使用迭代式 3.1，得到另一个有理数数列：

$$\begin{aligned} a'_1 &= \frac{1}{2}(\frac{7}{5} + \frac{10}{7}) = \frac{99}{70} = 1.4142857142857 \dots \\ a'_2 &= \frac{1}{2}(\frac{99}{70} + \frac{140}{99}) = \frac{19601}{13860} = 1.4142135642135642 \dots \\ a'_3 &= \frac{1}{2}(\frac{19601}{13860} + \frac{27720}{19601}) = \frac{768398401}{543339720} = 1.41421356237309504 \dots \\ a'_4 &= \frac{1}{2}(\frac{768398401}{543339720} + \frac{1086679440}{768398401}) = \frac{1180872205318713601}{835002744095575440} = 1.414213562373095048801 \dots \\ &\vdots \end{aligned}$$

无限递归执行下去，会得到另一个有理数的数列。随着 n 的增加，数列中项与项之间的间隔会越来越小。同时，随着序号 n 的增加，数列 a_n 和数列 a'_n 中项的差 $|a_n - a'_n|$ 也会越来越小。

注解

我们知道，这两个序列最终都会收敛到无理数 $\sqrt{2}$ ，但是 $\sqrt{2} \notin \mathbb{Q}$ 。我们称数列 $\{a_n \in \mathbb{Q}\}$ 和数列 $\{a'_n \in \mathbb{Q}\}$ 为柯西序列， $\sqrt{2}$ 为这两个柯西序列的极限。在有理数集中，柯西序列的极限不一定是有理数。因此我们需要对有理数集打上补丁，让这些序列的极限也在这个新集合中。

3.3.1 柯西序列与实数

定义 3.3.1 (有理数序列 sequence of rational numbers). 函数 $f: \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{Q}$ 为有理数序列，记为 $\{a_n\}$ ，其中 $a_n = f(n)$, $n \geq m, \dots$ 。

注解

有理数序列说明, 对于每个大于等于 m 的自然数, 都有唯一一个确定的有理数与之对应。例如:

1. 等比数列: $a_n = a_1 q^{n-1}$, $a_1 \neq 0$, $q \neq 0$, $n = 1, 2, 3, \dots$
2. 等差数列: $a_n = a_1 + (n-1)d$, $n = 1, 2, 3, \dots$
3. 斐波那契数列: $a_1 = 1$, $a_2 = 1$, $a_n = a_{n-1} + a_{n-2}$, $n \geq 3$
4. 素数数列: $a_1 = 2$, $a_2 = 3$, $a_3 = 5$, $a_4 = 7$, $a_5 = 11$, $a_6 = 13, \dots$

定义 3.3.2 (柯西序列 Cauchy sequence). 设 $\{a_n\}$ 是有理数序列。 $\{a_n\}$ 是柯西序列, 当且仅当, 对于任意给定的有理数 $\epsilon > 0$, 都存在一个正整数 N , 使得当 $i, j > N$ 时, 有

$$|a_i - a_j| \leq \epsilon$$

柯西序列也称为**基本序列**。

注解

柯西序列是一种特殊的有理数序列, 它要求随着序号 n 的增大, 序列中项与项之间的间隔越来越小。例如, 数列 $a_n = \frac{1}{n}$, $n \geq 1$ 和 $a_{n+1} = \frac{1}{2}(a_n + \frac{2}{a_n})$, $n \geq 0$ 都是柯西序列,

定义 3.3.3 (有界序列 bounded sequence). 设 $\{a_n\}$ 是有理数序列。如果存在有理数 $M > 0$, 使得对任意的 n 都有 $|a_n| \leq M$, 则称 $\{a_n\}$ 是有界序列。

定理 3.3.1. 柯西序列都是有界序列; 有界序列不一定是柯西序列。

注解

一个序列是柯西序列蕴含该序列是有界序列, 但有界序列不一定是柯西序列, 比如, $a_n = (-1)^n$, $n \geq 1$ 是有界序列, 但不是柯西序列。

定义 3.3.4 (实数 Real Number). 设 S 是所有有理柯西序列的集合

1. 等于关系: 对任意有理柯西序列 $\{a_n\}, \{b_n\} \in S$, $\{a_n\} = \{b_n\}$ 当且仅当, 对于任意有理数 $\epsilon > 0$, 都存在一个正整数 N , 使得当 $n > N$ 时, 有

$$|a_n - b_n| \leq \epsilon$$

2. 等价类: 任意 $\{a_n\} \in S$ 的等价类为

$$[\{a_n\}] = \{\{b_n\} \in S : \{a_n\} = \{b_n\}\}$$

称 S 关于 $=$ 关系的商集 $S/ = \{[\{a_n\}] = : \{a_n\} \in S\}$ 为实数集, 记为 \mathbb{R} 。实数集中的元素称为实数。

注解

实数是柯西序列关于等于关系的等价类，比如，数列 $a_n = \frac{1}{n}$, $n \geq 1$ 和数列 $b_n = \frac{1}{n^2}$, $n \geq 1$ 是不同的柯西序列，但它们满足等于关系，属于同一个等价类 $[\{a_n\}] = [\{b_n\}]$ ，表示同一个实数 0。再比如，在例 3.3.1 中，数列 a_n 和数列 a'_n 是不同的柯西序列，但它们满足等于关系，属于同一个等价类 $[\{a_n\}] = [\{a'_n\}]$ ，表示同一个实数 $\sqrt{2}$ 。全体有理数可以嵌入到实数集中，即 $\forall q \in \mathbb{Q}$ ，有 $q = [\{q, q, q, \dots\}] \in \mathbb{R}$ 。例如， $a_0 = 1, a_2 = 1, a_3 = 1, \dots$ 和 $b_0 = 0, b_2 = 0.9, b_3 = 0.999, \dots$ 都表示同一个实数 1。

定义 3.3.5 (实数加法 Addition of Real Numbers). 设 $[\{a_n\}], [\{b_n\}] \in \mathbb{R}$ ，定义加法为

$$[\{a_n\}] + [\{b_n\}] = [\{a_n + b_n\}]$$

命题 3.3.1. 实数加法的定义是良定义 (Well-defined) 的，即不依赖于代表元的选取，而且是封闭的。

证明. 先证明实数加法的封闭性，任意两个实数相加依然是实数。因为 $\{a_n\}, \{b_n\}$ 是柯西序列，根据柯西序列的定义，任意有理数 $\epsilon > 0$ ，都存在一个正整数 N_a ，使得当 $m, n > N_a$ 时，有 $|a_m - a_n| \leq \epsilon/2$ ；同理，存在一个正整数 N_b ，使得当 $m, n > N_b$ 时，有 $|b_m - b_n| \leq \epsilon/2$ ；设序列 $\{c_n\} = \{a_n + b_n\}$ ，令 $N = \max(N_a, N_b)$ ，则当 $m, n > N$ 时，有

$$\begin{aligned} |c_m - c_n| &= |a_m + b_m - (a_n + b_n)| \\ &= |(a_m - a_n) + (b_m - b_n)| \\ &\leq |a_m - a_n| + |b_m - b_n| \\ &\leq \epsilon/2 + \epsilon/2 = \epsilon \end{aligned}$$

所以 $\{c_n\}$ 是柯西序列。

再证明实数加法与实数代表元的选择无关。设任意与 $\{a_n\}, \{b_n\}$ 等价的柯西序列分别为 $\{a'_n\}, \{b'_n\}$ 。那么，对于任意有理数 $\epsilon > 0$ ，都存在一个正整数 N_a ，使得当 $i > N_a$ 时，有 $|a_i - a'_i| \leq \epsilon/2$ ；同理，存在一个正整数 N_b ，使得当 $j > N_b$ 时，有 $|b_j - b'_j| \leq \epsilon/2$ 。设序列 $\{c'_n\} = \{a'_n + b'_n\}$ ，令 $N = \max(N_a, N_b)$ ，则当 $n > N$ 时，有

$$\begin{aligned} |c'_n - c_n| &= |a'_n + b'_n - (a_n + b_n)| \\ &= |(a'_n - a_n) + (b'_n - b_n)| \\ &\leq |a'_n - a_n| + |b'_n - b_n| \\ &\leq \epsilon/2 + \epsilon/2 = \epsilon \end{aligned}$$

所以 $\{c'_n\}$ 与 $\{c_n\}$ 等价，表示同一个实数。 □

定义 3.3.6 (实数乘法 Multiplication of Real Numbers). 设 $[\{a_n\}], [\{b_n\}] \in \mathbb{R}$ ，定义乘法为

$$[\{a_n\}] \cdot [\{b_n\}] = [\{a_n b_n\}]$$

命题 3.3.2. 实数乘法的定义是良定义 (Well-defined) 的，即不依赖于代表元的选取，而且是封闭的。

证明. 先证明实数乘法的封闭性, 任意两个实数相乘依然是实数。因为 $\{a_n\}, \{b_n\}$ 是柯西序列, 也是有界序列, 存在有理数 M , 使得对任意的 n 都有 $|a_n| \leq M$ 和 $|b_n| \leq M$ 。根据柯西序列的定义, 任意有理数 $\epsilon > 0$, 都存在一个正整数 N_a , 使得当 $m, n > N_a$ 时, 有 $|a_m - a_n| \leq \epsilon/2M$; 同理, 存在一个正整数 N_b , 使得当 $m, n > N_b$ 时, 有 $|b_m - b_n| \leq \epsilon/2M$; 设序列 $\{c_n\} = \{a_n b_n\}$, 令 $N = \max(N_a, N_b)$, 则当 $m, n > N$ 时, 有:

$$\begin{aligned} |c_m - c_n| &= |a_m * b_m - a_n * b_n| \\ &= |a_m * b_m - a_m * b_n + a_m * b_n - a_n * b_n| \\ &\leq |a_m * b_m - a_m * b_n| + |a_m * b_n - a_n * b_n| \\ &= |a_m| |b_m - b_n| + |b_n| |a_m - a_n| \\ &\leq M \frac{\epsilon}{2M} + M \frac{\epsilon}{2M} \\ &= \epsilon \end{aligned}$$

所以 $\{c_n\}$ 是柯西序列。

再证明实数乘法与实数代表元的选择无关。设任意与 $\{a_n\}, \{b_n\}$ 等价的柯西序列分别为 $\{a'_n\}, \{b'_n\}$ 。那么, 对于任意有理数 $\epsilon > 0$, 都存在一个正整数 N_a , 使得当 $i > N_a$ 时, 有 $|a_i - a'_i| \leq \epsilon/2M$; 同理, 存在一个正整数 N_b , 使得当 $j > N_b$ 时, 有 $|b_j - b'_j| \leq \epsilon/2M$ 。设序列 $\{c'_n\} = \{a'_n b'_n\}$, 令 $N = \max(N_a, N_b)$, 则当 $n > N$ 时, 有

$$\begin{aligned} |c'_m - c_m| &= |a'_m * b'_m - a_m * b_m| \\ &= |a'_m * b'_m - a'_m * b_m + a'_m * b_m - a_m * b_m| \\ &\leq |a'_m * b'_m - a'_m * b_m| + |a'_m * b_m - a_m * b_m| \\ &= |a'_m| |b'_m - b_m| + |b_m| |a'_m - a_m| \\ &\leq M \frac{\epsilon}{2M} + M \frac{\epsilon}{2M} \\ &= \epsilon \end{aligned}$$

所以 $\{c'_n\}$ 与 $\{c_n\}$ 等价, 表示同一个实数。 □

定义 3.3.7 (实数加法逆元与减法). 设 $a = [\{a_n\}] = \in \mathbb{R}$, 加法逆元记为 $-a$, 使得

$$a + (-a) = [\{0\}] =$$

那么:

$$-a := [\{-a_n\}] =$$

设 $a_1, a_2 \in \mathbb{R}$, 实数的减法定义为:

$$a_1 - a_2 = a_1 + (-a_2)$$

定义 3.3.8 (实数乘法逆元与除法). 设 $a = [\{a_n\}] = \in \mathbb{R}$, 且 $a \neq 0$, 乘法逆元记为 a^{-1} , 使得

$$a \cdot a^{-1} = [\{1\}] =$$

那么:

$$a^{-1} := [\{a_n^{-1}\}] =$$

设 $a_1, a_2 \in \mathbb{R}$, $a_2 \neq 0$, 实数的除法定义为:

$$a_1 / a_2 = a_1 \cdot a_2^{-1}$$

命题 3.3.3 (实数代数运算的性质). 设 $a, b, c \in \mathbb{R}$, 则实数的代数运算具有以下性质:

1. 交换律: $a + b = b + a$
2. 加法结合律: $(a + b) + c = a + (b + c)$;
3. 加法单位元: 存在唯一的实数 0 , 使得 $a + 0 = a$;
4. 加法逆元: 任意实数 a 存在唯一的实数 $-a$, 使得 $a + (-a) = 0$;
5. 乘法交换律: $ab = ba$;
6. 乘法结合律: $(ab)c = a(bc)$;
7. 乘法单位元: 存在唯一的实数 1 , 使得 $a \cdot 1 = a$;
8. 乘法逆元: 任意非零实数 a 存在唯一的实数 a^{-1} , 使得 $a \cdot a^{-1} = 1$;
9. 乘法对加法的分配律: $a(b + c) = ab + ac$.
10. 乘法零元: $a \cdot 0 = 0$.

注解

实数的四则运算的定义都是良定义的, 即不依赖于代表元的选取, 而且是封闭的。实数集和加法乘法一起, 构成一个数域, 称为实数域, 记为 $(\mathbb{R}, +, \cdot)$ 。

定义 3.3.9 (实数的序 Order of Real Numbers). 设 $[\{a_n\}]_=, [\{b_n\}]_= \in \mathbb{R}$, 定义序为

$$[\{a_n\}]_= \leq [\{b_n\}]_= \iff \exists N, \forall n > N, a_n \leq b_n$$

定义 3.3.10 (实数的绝对值 Absolute Value of Real Numbers). 设 $a \in \mathbb{R}$, 定义其绝对值为

$$|a| = \begin{cases} a, & a \geq 0 \\ -a, & a < 0 \end{cases}$$

定义 3.3.11 (实数的距离 Distance of Real Numbers). 设 $a, b \in \mathbb{R}$, 定义它们之间的距离为

$$d(a, b) = |a - b|$$

命题 3.3.4 (实数绝对值的性质). 设 $a, b \in \mathbb{R}$, 则有:

1. 非负性: $|a| \geq 0$, 且 $|a| = 0 \iff a = 0$;
2. 乘法: $|ab| = |a||b|$;
3. 三角不等式: $|a + b| \leq |a| + |b|$.
4. 反三角不等式: $||a| - |b|| \leq |a - b|$.
5. 距离的非负性: $d(a, b) \geq 0$, 且 $d(a, b) = 0 \iff a = b$;
6. 距离的对称性: $d(a, b) = d(b, a)$;
7. 距离的三角不等式: $d(a, c) \leq d(a, b) + d(b, c)$.

注解

二元组 (\mathbb{R}, \leq) 构成一个全序集, 实数绝对值运算同样满足非负性、三角不等式、反三角不等式等, 二元组 (\mathbb{R}, d) 构成一个度量空间。

3.3.2 实数集的完备性

实数相比有理数最大的区别是“连续”, 准确的说, 实数集是完备的。实数的完备性使得极限运算在实数集上是良定义的。

定义 3.3.12 (实数序列 sequence of real numbers). 函数 $f: \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}$ 为实数序列, 记为 $\{x_n\}$, 其中 $x_n = f(n)$, $n \geq m, \dots$ 。

定义 3.3.13 (实数柯西序列 Cauchy sequence of real numbers). 设 $\{x_n\}$ 是实数序列。 $\{x_n\}$ 是柯西序列, 当且仅当, 对于任意给定的实数 $\epsilon > 0$, 都存在一个正整数 N , 使得当 $i, j > N$ 时, 有

$$d(x_i, x_j) = |x_i - x_j| \leq \epsilon$$

定义 3.3.14 (有界序列 bounded sequence of real numbers). 设 $\{x_n\}$ 是实数序列。如果存在实数 $M > 0$, 使得对任意的 n 都有 $|x_n| \leq M$, 则称 $\{x_n\}$ 是有界序列。

定理 3.3.2. 实数柯西序列都是有界序列; 有界序列不一定是柯西序列。

注解

实数序列的定义同有理数序列, 不过序列是由实数构成的。类似地可以定义实数柯西序列和有界序列。一个实数序列是柯西序列蕴含该序列是有界序列。

定义 3.3.15 (收敛序列与序列极限 Convergent Sequence and Limit of Sequence). 设 $\{x_n\}$ 是实数序列。 $\{x_n\}$ 收敛于实数 x , 记为 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = x$, 当且仅当, 对于任意给定的实数 $\epsilon > 0$, 都存在一个正整数 N , 使得当 $n > N$ 时, 有

$$d(x_n, x) = |x_n - x| \leq \epsilon$$

此时, 称 x 为序列 $\{x_n\}$ 的极限。

命题 3.3.5. 收敛序列的极限是唯一。

证明. 使用反证法, 假设实数收敛序列 $\{x_n\}$ 收敛于极限 x 和 y 。那么设 $\epsilon = \frac{|x-y|}{2} > 0$, 根据收敛序列的定义, 存在正整数 N_1 , 使得当 $n > N_1$ 时, 有 $|x_n - x| < \epsilon$; 同理, 存在正整数 N_2 , 使得当 $n > N_2$ 时, 有 $|x_n - y| < \epsilon$; 令 $N = \max(N_1, N_2)$, 则当 $n > N$ 时, 有

$$\begin{aligned} |x - y| &= |x - x_n + x_n - y| \\ &\leq |x - x_n| + |x_n - y| \\ &< \epsilon + \epsilon = 2\epsilon = |x - y| \end{aligned}$$

这说明 $|x - y| < |x - y|$, 矛盾, 所以假设不成立, 极限是唯一的。□

下面不加证明的给出实数集完备性的两个等价定理。

定理 3.3.3 (实数集的完备性 Completeness of Real Numbers). 实数集具有完备性, 当且仅当, 所有的实数柯西序列都是收敛实数序列。

定理 3.3.4 (柯西收敛准则 Cauchy Convergence Criterion). 实数序列 $\{x_n\}$ 收敛的充分必要条件是: 对于任给的实数 $\epsilon > 0$, 都存在正整数 N , 使得当 $i, j > N$ 时, 有 $d(x_i, x_j) = |x_i - x_j| \leq \epsilon$ 。

注解

柯西收敛准则和实数完备性是两条等价的定理, 它们说明了实数集和有理数集的本质区别。稠密的有理数集对极限运算不封闭, 一个有理数柯西序列的极限可能不是有理数, 例 3.3.1 中的两个柯西序列在有理数集上没有极限, 但在实数集上都收敛于 $\sqrt{2}$ 。完备性保证了有理数柯西列一定能收敛到一个实数, 而不会收敛到一个不属于实数集的元素。换句话说, 在实数集中, 柯西序列与收敛序列是等价的, 实数集对极限运算封闭。

3.3.3 实数的幂运算

定义 3.3.16 (实数的自然数次幂). 设 $x \in \mathbb{R}$ 是实数, $n \in \mathbb{N}$ 是自然数, x 的 n 次幂记为 x^n , 递归地定义:

1. $x^0 = 1$
2. $x^n = x \cdot x^{n-1}, n \geq 1$

定义 3.3.17 (实数的负整数次幂). 设 $x \neq 0 \in \mathbb{R}$, $n \in \mathbb{N}^+$ 是正整数, x 的 $-n$ 次幂记为 x^{-n} , 定义

$$x^{-n} = \frac{1}{x^n}$$

定义 3.3.18 (正实数的真分数次幂). 设 $x > 0 \in \mathbb{R}$ 是正实数, $n \in \mathbb{N}^+$ 是正整数, x 的 $\frac{1}{n}$ 次幂记为 $x^{\frac{1}{n}}$, 定义

$$x^{\frac{1}{n}} = \sup\{y \in \mathbb{R} : y \geq 0, y^n \leq x\}$$

$x^{\frac{1}{n}}$ 称为 x 的 n 次方根, 也常记为 $\sqrt[n]{x}$ 。

命题 3.3.6 (n 次方根的存在性). 设 $x > 0 \in \mathbb{R}$ 是正实数, $n \in \mathbb{N}^+$ 是正整数, 则 x 的 n 次方根 $x^{\frac{1}{n}}$ 存在且唯一。

定义 3.3.19 (正实数的有理数次幂). 设 $x > 0 \in \mathbb{R}$ 是正实数, $m \in \mathbb{Z}$ 是整数, $n \in \mathbb{N}^+$ 是正整数, x 的 $\frac{m}{n}$ 次幂记为 $x^{\frac{m}{n}}$, 定义

$$x^{\frac{m}{n}} = (x^{\frac{1}{n}})^m$$

定理 3.3.5 (正实数的有理数次幂的性质). 设 $x, y > 0 \in \mathbb{R}$, $m, n \in \mathbb{N}^+$, $p, q \in \mathbb{Q}$ 则

1. $(x^{\frac{1}{n}})^n = x$
2. $x^{\frac{1}{m}} = (x^{\frac{1}{n}})^{\frac{n}{m}}$

$$3. (xy)^p = x^p y^p$$

$$4. (x^p)^q = x^{pq}$$

$$5. x^p \cdot x^q = x^{p+q}$$

$$6. x^p / x^q = x^{p-q}$$

$$7. \text{ 如果 } y = x^{1/n}, \text{ 那么 } x = y^n$$

$$8. \text{ 若 } x \leq y, \text{ 则 } x^{\frac{1}{n}} \leq y^{\frac{1}{n}}$$

注解

实数的有理数次幂要求底数为正实数，指数可以是任意有理数。在实数集中，负实数的有理数次幂没有定义，比如 $(-1)^{\frac{1}{2}}$ 是无意义的，也即不存在实数 x ，使得 $x^2 = -1$ 。这说明实数集对开方运算不封闭，需要再次扩充数集，得到复数集。

3.4 复数

复数的引入源自解三次代数方程的负数平方根问题。在实数集中，一元二次方程 $x^2 + 1 = 0$ 无解。如果，令 $i^2 = -1$ ，称为虚数单位（Imaginary Unit），定义一个全新的数集——复数集，那么任何一个代数方程在复数集中都有解，并且解的个数恰好等于方程的次数，该结论称为代数基本定理。

定理 3.4.1 (代数基本定理 Fundamental Theorem of Algebra). 每一个次数为 n 的非零单变量复系数多项式 $P(z) = a_n z^n + a_{n-1} z^{n-1} + \cdots + a_1 z + a_0$, $a_n \neq 0$ 在复数域上恰有 n 个根（重根按重数计算）。

3.4.1 复数的定义

定义 3.4.1 (复数 Complex Number). 有序对 $(a, b) \in \mathbb{R}^2$ 记为 $a + bi$ ，其中，

1. 约定: $i^2 = -1$;
2. 等于关系: $a + bi = c + di \Leftrightarrow a = c \wedge b = d$;
3. 等价类: $[a + bi] = \{(c, d) \in \mathbb{R}^2 : a + bi = c + di\}$;

称 \mathbb{R}^2 关于 $=$ 关系的商集 $\mathbb{R}^2 / = = \{[a + bi] : a + bi \in \mathbb{R}^2\}$ 为复数集，记为 \mathbb{C} 。复数集中的元素称为复数。

注解

复数同样是一个等价类，但集合中只有一个有序对 (a, b) ，所以可以直接用 $a + bi$ 来表示复数。在复数中，实数 a 称为复数的实部（Real Part），记为 $\text{Re}(a + bi) = a$ ；实数 b 称为复数的虚部（Imaginary Part），记为 $\text{Im}(a + bi) = b$ 。全体实数可以嵌入到复数集中，即 $\forall a \in \mathbb{R}$ ，有 $a = a + 0i \in \mathbb{C}$ 。

定义 3.4.2 (复数的加法与乘法 Addition and Multiplication of Complex Numbers). 设 $z_1 = a + bi$, $z_2 = c + di \in \mathbb{C}$ ，定义复数的加法与乘法如下：

1. 加法: $z_1 + z_2 = (a + c) + (b + d)i$;
2. 乘法: $z_1 \cdot z_2 = (ac - bd) + (ad + bc)i$.

注解

复数加法和乘法是良定义的，即不依赖于代表元的选取，而且是封闭的。

定义 3.4.3 (复数的加法逆元与减法). 设 $z = a + bi \in \mathbb{C}$ ，则复数的加法逆元记为 $-z$ ，使得：

$$z + (-z) = 0 + 0i$$

那么

$$-z := -a - bi$$

设 $z_1 = a_1 + b_1i$, $z_2 = a_2 + b_2i \in \mathbb{C}$, 复数的减法定义为

$$z_1 - z_2 = z_1 + (-z_2) = (a_1 - a_2) + (b_1 - b_2)i$$

注解

复数的加法逆元是良定义的, 任意复数都存在唯一的加法逆元。复数乘法的逆元需要先定义复数的共轭和模。

定义 3.4.4 (复数的共轭 Conjugate of Complex Number). 设 $z = a + bi \in \mathbb{C}$, 复数的共轭记为 \bar{z} 或 z^* , 定义为

$$\bar{z} = a - bi$$

定义 3.4.5 (复数的模 Modulus of Complex Number). 设 $z = a + bi \in \mathbb{C}$, 复数的模记为 $|z|$, 定义为

$$|z| = \sqrt{a^2 + b^2}$$

命题 3.4.1 (复数的模与共轭的关系). 设 $z = a + bi \in \mathbb{C}$, 则

$$|z|^2 = a^2 + b^2 = z\bar{z}$$

定义 3.4.6 (复数的度量 Metric of Complex Number). 设 $z_1 = a + bi$, $z_2 = c + di \in \mathbb{C}$, 定义复数集上的度量为

$$d(z_1, z_2) = |z_1 - z_2| = \sqrt{(a - c)^2 + (b - d)^2}$$

命题 3.4.2 (复数的模的性质). 设 $z_1, z_2, z \in \mathbb{C}$, 则复数的模具有以下性质:

1. 非负性: $|z| \geq 0$, 且 $|z| = 0 \Leftrightarrow z = 0$;
2. 乘积性: $|z_1 z_2| = |z_1| |z_2|$;
3. 三角不等式: $|z_1 + z_2| \leq |z_1| + |z_2|$.
4. 反三角不等式: $||z_1| - |z_2|| \leq |z_1 - z_2|$.
5. 共轭不变性: $|z| = |\bar{z}|$.
6. 度量非负性: $d(z_1, z_2) \geq 0$, 且 $d(z_1, z_2) = 0 \Leftrightarrow z_1 = z_2$;
7. 度量对称性: $d(z_1, z_2) = d(z_2, z_1)$;
8. 度量三角不等式: $d(z_1, z_2) \leq d(z_1, z) + d(z, z_2)$.

注解

复数的共轭是复数集上一个自反的双射, 任何一个复数都有唯一的共轭复数。复数集没有定义序关系, 所以任意两个复数之间没有大小关系。但是, 复数定义了模运算, 是实数集绝对值运算的推广。复数的度量同样满足非负性、对称性和三角不等式。所以 (\mathbb{C}, d) 是一个度量空间。

定义 3.4.7 (复数的乘法逆元与除法). 设 $z = a + bi \in \mathbb{C}$, $z \neq 0 + 0i$, 则复数的乘法逆元记为 z^{-1} , 使得:

$$zz^{-1} = 1 + 0i$$

那么

$$z^{-1} := \frac{\bar{z}}{|z|^2} = \frac{\bar{z}}{z\bar{z}} = \frac{a}{a^2 + b^2} - \frac{b}{a^2 + b^2}i$$

设 $z_1 = a_1 + b_1i$, $z_2 = a_2 + b_2i \in \mathbb{C}$, $z_2 \neq 0 + 0i$, 复数的除法定义为

$$\begin{aligned} \frac{z_1}{z_2} &= z_1 z_2^{-1} = \frac{z_1 \cdot \bar{z}_2}{|z_2|^2} = \frac{z_1 \cdot \bar{z}_2}{z_2 \bar{z}_2} \\ &= \frac{a_1 a_2 + b_1 b_2}{a_2^2 + b_2^2} + \frac{b_1 a_2 - a_1 b_2}{a_2^2 + b_2^2}i \end{aligned}$$

命题 3.4.3 (复数代数运算的性质). 设 $z_1, z_2, z_3, z \in \mathbb{C}$, 则

1. 加法交换律: $z_1 + z_2 = z_2 + z_1$;
2. 加法结合律: $(z_1 + z_2) + z_3 = z_1 + (z_2 + z_3)$;
3. 加法单位元: $z + 0 = z$;
4. 加法逆元: 任意复数 z 都有唯一的加法逆元 $-z$, 使得 $z + (-z) = 0$;
5. 加法共轭: $\overline{z_1 + z_2} = \bar{z}_1 + \bar{z}_2$;
6. 乘法交换律: $z_1 z_2 = z_2 z_1$;
7. 乘法结合律: $(z_1 z_2) z_3 = z_1 (z_2 z_3)$;
8. 乘法单位元: $z \cdot 1 = z$;
9. 乘法零元: $z \cdot 0 = 0$;
10. 乘法逆元: 任意非零复数 z 都有唯一的乘法逆元 z^{-1} , 使得 $zz^{-1} = 1$;
11. 乘法对加法的分配律: $z_1(z_2 + z_3) = z_1 z_2 + z_1 z_3$.
12. 乘法共轭性: $\overline{z_1 z_2} = \bar{z}_1 \bar{z}_2$.

3.4.2 复数集的完备性

定义 3.4.8 (复数柯西序列 Cauchy Sequence of Complex Numbers). 设 $\{z_n = a_n + b_n i\}$ 是复数集 \mathbb{C} 上的一个序列, 如果对任意的 $\epsilon > 0$, 都存在正整数 N , 使得当 $m, n > N$ 时, 有

$$d(z_n, z_m) < \epsilon$$

则称 $\{z_n\}$ 是复数集 \mathbb{C} 上的一个柯西序列。

命题 3.4.4. 一个复数序列 $\{z_n = a_n + b_n i\}$ 是柯西序列, 当且仅当, 其实部序列 $\{a_n\}$ 和虚部序列 $\{b_n\}$ 都是柯西序列。

注解

复数柯西序列的定义与实数柯西序列的定义完全相同，都是随着序号的增大，序列中任意两项之间的距离可以任意小。

定义 3.4.9 (复数收敛序列与序列极限 Convergent Sequence and Limit of Sequence). 设 $\{x_n\}$ 是复数序列。 $\{x_n\}$ 收敛于复数 x ，记为 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = x$ ，当且仅当，对于任意给定的实数 $\epsilon > 0$ ，都存在一个正整数 N ，使得当 $n > N$ 时，有

$$d(x_n, x) = |x_n - x| \leq \epsilon$$

此时，称 x 为序列 $\{x_n\}$ 的极限。

命题 3.4.5. 一个复数序列 $\{z_n = a_n + b_n i\}$ 收敛于复数 $z = a + bi$ ，当且仅当， $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a$ 且 $\lim_{n \rightarrow \infty} b_n = b$ 。

定理 3.4.2 (复数集的完备性 Completeness of Complex Numbers). 复数集具有完备性，当且仅当，所有的复数柯西序列都是收敛复数序列。

定理 3.4.3 (柯西收敛准则 Cauchy Convergence Criterion). 复数序列 $\{z_n\}$ 收敛的充分必要条件是：对于任给的实数 $\epsilon > 0$ ，都存在正整数 N ，使得当 $i, j > N$ 时，有 $d(z_i, z_j) = |z_i - z_j| \leq \epsilon$ 。

注解

复数集关于度量 d 是完备的，即任意复数柯西序列在复数集中收敛。复数集的完备性来源于实数集的完备性。

3.4.3 复数的幂运算

定义 3.4.10 (复数的自然数次幂). 设 $z \in \mathbb{C}$ 是复数， $n \in \mathbb{N}$ 是自然数， z 的 n 次幂记为 z^n ，递归地定义：

1. $z^0 = 1 + 0i$
2. $z^n = z \cdot z^{n-1}$, $n \geq 1$

定义 3.4.11 (复数的负整数次幂). 设 $z \in \mathbb{C}$ ， $z \neq 0$ 是非零复数， $n \in \mathbb{N}^+$ 是正整数，则

$$z^{-n} = (z^{-1})^n = \frac{1}{z^n}$$

定义 3.4.12 (复数的有理数次幂). 设 $z \in \mathbb{C}$ ， $z \neq 0$ 是非零复数， $n \in \mathbb{N}^+$ 是正整数， z 的 $\frac{1}{n}$ 次幂记为 $z^{\frac{1}{n}}$ ，定义

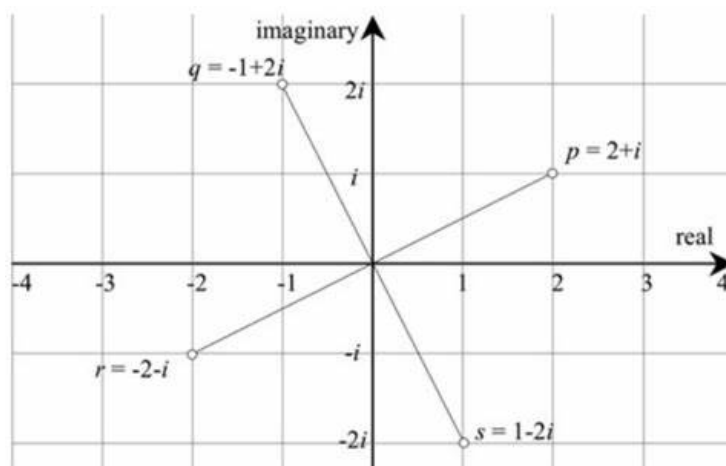


图 3.1: 复平面

3.4.4 复数的三角式

复数 $z = a + bi$ 可以表示为二维平面上的一个点 (a, b) ，其中 a 是横坐标， b 是纵坐标。这个二维平面称为复平面 (Complex Plane)，横轴称为实轴 (Real Axis)，纵轴称为虚轴 (Imaginary Axis)。

定义 3.4.13 (复数的三角式)。复平面上一点用极坐标表示：

$$\begin{cases} x = \rho \cos \varphi \\ y = \rho \sin \varphi \end{cases}$$

得到复数的三角式：

$$z = x + yi = \rho(\cos \varphi + i \sin \varphi) \quad (3.2)$$

其中，

1. $\rho = |z| = \sqrt{x^2 + y^2}$ 为复数的模 (Modulus)；
2. $\varphi = \arg z$ 为复数的辐角 (Argument)，既正实轴到复数向量的逆时针夹角。一个复数的幅角值不能唯一确定，可以取无穷多个值，并且彼此相差 $2k\pi$, $k \in \mathbb{Z}$ 。

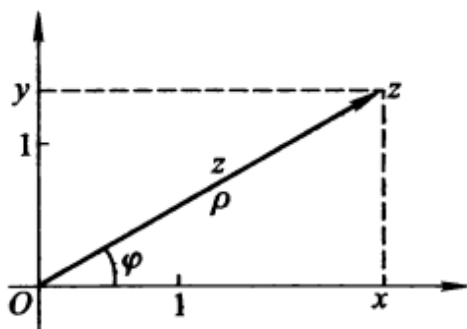


图 3.2: 复数的三角式

定理 3.4.4 (复数乘法的三角式). 设 $z_1 = \rho_1(\cos \varphi_1 + i \sin \varphi_1)$, $z_2 = \rho_2(\cos \varphi_2 + i \sin \varphi_2) \in \mathbb{C}$, 则

$$z_1 z_2 = \rho_1 \rho_2 [\cos(\varphi_1 + \varphi_2) + i \sin(\varphi_1 + \varphi_2)]$$

推论 3.4.1 (棣莫弗公式 De Moivre's Theorem). 设 $z = \rho(\cos \varphi + i \sin \varphi) \in \mathbb{C}$, $n \in \mathbb{Z}$, 则

$$z^n = \rho^n [\cos(n\varphi) + i \sin(n\varphi)] \quad (3.3)$$

注解

通过复数的三角式, 说明复数乘法的几何意义: 两个复数相乘, 模相乘, 幅角相加。将 z_1 的长度拉伸 ρ_2 倍, 并逆时针旋转 φ_2 角度, 得到 $z_1 z_2$ 。

3.4.5 复数的指数式

定理 3.4.5 (欧拉公式 Euler's Formula). 设 $\theta \in \mathbb{R}$, 则

$$e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta \quad (3.4)$$

定义 3.4.14 (复数的指数式). 将欧拉公式 3.4 代入复数的三角式 3.2, 得到复数的指数式:

$$z = \rho e^{i\varphi} \quad (3.5)$$

其中, $\rho = |z|$ 为复数的模, $\varphi = \arg z$ 为复数的辐角。

定理 3.4.6 (复数乘法的指数式). 设 $z_1 = \rho_1 e^{i\varphi_1}$, $z_2 = \rho_2 e^{i\varphi_2} \in \mathbb{C}$, 则

$$z_1 z_2 = \rho_1 \rho_2 e^{i(\varphi_1 + \varphi_2)}$$

定理 3.4.7 (复数除法的指数式). 设 $z_1 = \rho_1 e^{i\varphi_1}$, $z_2 = \rho_2 e^{i\varphi_2} \in \mathbb{C}$, $z_2 \neq 0$, 则

$$\frac{z_1}{z_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2} e^{i(\varphi_1 - \varphi_2)}$$

3.5 四元数

从自然数到复数的扩充非常成功，整数的引入定义了减法，有理数的引入定义了除法，实数的引入定义了极限运算，复数的引入解决了多项式方程的根问题。复数的乘法可以表示二元平面内的旋转，为了表示更高维的旋转，需要引入更高维的数系，而四元数常用来表示三维空间内的旋转。

注解

之所以用四元数表示三维旋转，而不是用三元数，是因为三元数无法定义封闭的乘法运算，所以不能成为一个有用的数系。即便如此，四元数也不得不放弃乘法交换律。八元数甚至无法定义乘法结合律。

3.5.1 四元数的定义

定义 3.5.1 (四元数 Quaternion). 有序数组 $(a, b, c, d) \in \mathbb{R}^4$ 记为 $q = a + bi + cj + dk$ ，其中，

1. 约定： $i^2 = j^2 = k^2 = ijk = -1$ ；
2. 等于关系： $a + bi + cj + dk = a' + b'i + c'j + d'k \iff a = a', b = b', c = c', d = d'$ ；
3. 等价类： $[a + bi + cj + dk] = \{(e, f, g, h) \in \mathbb{R}^4 : a + bi + cj + dk = e + fi + gj + hk\}$ 。

称 \mathbb{R}^4 关于 $=$ 关系的商集 $\mathbb{R}^4 / \equiv = \{[a + bi + cj + dk] : a + bi + cj + dk \in \mathbb{R}^4\}$ 为四元数集，记为 \mathbb{H} 。四元数集中的元素称为四元数。

注解

四元数是一个等价类，但集合中只有一个有序数组作为代表元，所以可以直接用 $a + bi + cj + dk$ 来表示四元数。在四元数中，实数 a 称为四元数的实部， $bi + cj + dk$ 称为四元数的虚部。四元数可以用一个标量和一个三维向量来表示，即 $q = (a, \mathbf{v})$ ，其中 $\mathbf{v} = (b, c, d)$ 。观察四元数定义中的虚部的约定，可得下表：

\times	1	i	j	k
1	1	i	j	k
i	i	-1	k	$-j$
j	j	$-k$	-1	i
k	k	j	$-i$	-1

定义 3.5.2 (四元数的加法). 设 $q_1 = a_1 + b_1i + c_1j + d_1k$, $q_2 = a_2 + b_2i + c_2j + d_2k \in \mathbb{H}$ ，定义四元数的加法：

$$q_1 + q_2 = (a_1 + a_2) + (b_1 + b_2)i + (c_1 + c_2)j + (d_1 + d_2)k$$

定义 3.5.3 (四元数加法逆元与减法). 设 $q = a + bi + cj + dk \in \mathbb{H}$ ，四元数的加法逆元记为 $-q$ ，满足：

$$q + (-q) = 0 + 0i + 0j + 0k$$

那么

$$-q := -a - bi - cj - dk$$

四元数的减法定义为:

$$q_1 - q_2 = q_1 + (-q_2)$$

定义 3.5.4 (四元数的乘法). 设 $q_1 = a_1 + b_1i + c_1j + d_1k$, $q_2 = a_2 + b_2i + c_2j + d_2k \in \mathbb{H}$, 定义四元数的乘法:

$$\begin{aligned} q_1 q_2 &= (a_1 + b_1i + c_1j + d_1k)(a_2 + b_2i + c_2j + d_2k) \\ &= (a_1a_2 - b_1b_2 - c_1c_2 - d_1d_2) \\ &\quad + (a_1b_2 + b_1a_2 + c_1d_2 - d_1c_2)i \\ &\quad + (a_1c_2 - b_1d_2 + c_1a_2 + d_1b_2)j \\ &\quad + (a_1d_2 + b_1c_2 - c_1b_2 + d_1a_2)k \end{aligned}$$

四元数的乘法还可以写成矩阵的形式:

$$q_1 q_2 = \begin{bmatrix} a_1 & -b_1 & -c_1 & -d_1 \\ b_1 & a_1 & -d_1 & c_1 \\ c_1 & d_1 & a_1 & -b_1 \\ d_1 & -c_1 & b_1 & a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_2 \\ b_2 \\ c_2 \\ d_2 \end{bmatrix}$$

如果用 $q_1 = (a_1, \mathbf{v}_1)$, $q_2 = (a_2, \mathbf{v}_2)$ 来表示四元数, 则有:

$$q_1 q_2 = (a_1a_2 - \mathbf{v}_1 \cdot \mathbf{v}_2, a_1\mathbf{v}_2 + a_2\mathbf{v}_1 + \mathbf{v}_1 \times \mathbf{v}_2)$$

其中, $\mathbf{v}_1 \cdot \mathbf{v}_2$ 是三维向量的点积, $\mathbf{v}_1 \times \mathbf{v}_2$ 是三维向量的叉积。

$$\mathbf{v}_1 \cdot \mathbf{v}_2 = b_1b_2 + c_1c_2 + d_1d_2$$

$$\mathbf{v}_1 \times \mathbf{v}_2 = \begin{vmatrix} i & j & k \\ b_1 & c_1 & d_1 \\ b_2 & c_2 & d_2 \end{vmatrix} = (c_1d_2 - d_1c_2)i + (d_1b_2 - b_1d_2)j + (b_1c_2 - c_1b_2)k$$

注解

四元数的加法和乘法都是良定义的, 即封闭, 且与代表元的选择无关。四元数加法逆元是良定义的, 任意一个四元数都有唯一的加法逆元。四元数的加法满足交换律和结合律, 但乘法不满足交换律, 只满足结合律。在定义四元数除法之前, 需要先定义四元数的模和共轭。

定义 3.5.5 (四元数的共轭 Conjugate). 设 $q = a + bi + cj + dk \in \mathbb{H}$, 四元数的共轭记为 \bar{q} 或 q^* , 那么:

$$\bar{q} = a - bi - cj - dk$$

定义 3.5.6 (四元数的模 Modulus). 设 $q = a + bi + cj + dk \in \mathbb{H}$, 四元数的模记为 $|q|$, 那么:

$$|q| = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2 + d^2}$$

命题 3.5.1 (四元数的共轭与模的关系). 设 $q = a + bi + cj + dk \in \mathbb{H}$, 那么:

$$q\bar{q} = \bar{q}q = |q|^2$$

定义 3.5.7 (四元数的度量). 设 $q_1, q_2 \in \mathbb{H}$, 定义四元数的度量:

$$d(q_1, q_2) = |q_1 - q_2|$$

定义 3.5.8 (四元数的逆元与除法). 设 $q = a + bi + cj + dk \in \mathbb{H}$, $q \neq 0$, 四元数的逆元记为 q^{-1} , 满足:

$$qq^{-1} = q^{-1}q = 1$$

由此可得:

$$q^{-1} = \frac{\bar{q}}{|q|^2} = \frac{\bar{q}}{q\bar{q}} = \frac{a - bi - cj - dk}{a^2 + b^2 + c^2 + d^2}$$

设 $q_1, q_2 \in \mathbb{H}$, $q_2 \neq 0$, 四元数的除法定义为:

$$q_1/q_2 = q_1q_2^{-1} = \frac{q_1\bar{q}_2}{q_2\bar{q}_2}$$

3.5.2 四元数与旋转

定义 3.5.9 (单位四元数 Unit Quaternion). 设 $q = a + bi + cj + dk \in \mathbb{H}$, 如果 $|q| = 1$, 则称 q 为单位四元数。

3.5.3 对偶四元数

定义 3.5.10 (对偶四元数 Dual Quaternion). 有序数组 $(a, b, c, d, e, f, g, h) \in \mathbb{R}^8$ 记为 $Q = a + bi + cj + dk + \epsilon(e + fi + gj + hk)$, 其中,

1. 约定: $i^2 = j^2 = k^2 = ijk = -1$, $\epsilon^2 = 0$, $\epsilon \neq 0$;

2. 等于关系: $a + bi + cj + dk + \epsilon(e + fi + gj + hk) = a' + b'i + c'j + d'k + \epsilon(e' + f'i + g'j + h'k)$

$$\iff a = a', b = b', c = c', d = d', e = e', f = f', g = g', h = h'$$

3. 等价类: $[a + bi + cj + dk + \epsilon(e + fi + gj + hk)] = \{(l, m, n, o, p, q, r, s) \in \mathbb{R}^8 : a + bi + cj + dk + \epsilon(e + fi + gj + hk) = l + mi + nj + ok + \epsilon(p + qi + rj + sk)\}$ 。

称 \mathbb{R}^8 关于 $=$ 关系的商集 $\mathbb{R}^8/_=$ 为对偶四元数集, 记为 \mathbb{DQ} 。对偶四元数集中的元素称为对偶四元数。

注解

对偶四元数可以表示三维空间中任何刚体变换，包括旋转和平移。根据四元数虚部的约定，可得下表：

\times	1	i	j	k	ϵ	ϵi	ϵj	ϵk
1	1	i	j	k	ϵ	ϵi	ϵj	ϵk
i	i	-1	k	$-j$	ϵi	$-\epsilon$	ϵk	$-\epsilon j$
j	j	$-k$	-1	i	ϵj	$-\epsilon k$	$-\epsilon$	ϵi
k	k	j	$-i$	-1	ϵk	ϵj	$-\epsilon i$	$-\epsilon$
ϵ	ϵ	ϵi	ϵj	ϵk	0	0	0	0
ϵi	ϵi	$-\epsilon$	ϵk	$-\epsilon j$	0	0	0	0
ϵj	ϵj	$-\epsilon k$	$-\epsilon$	ϵi	0	0	0	0
ϵk	ϵk	ϵj	$-\epsilon i$	$-\epsilon$	0	0	0	0

Chapter 4

抽象代数

4.1 群

4.1.1 群的定义

定义 4.1.1 (群 Group). 设 G 是一个非空集合, $*$ 是定义在 G 上的一个二元运算, 如果对任意的 $a, b, c \in G$ 都满足以下四个条件:

1. 封闭性: $a * b \in G$;
2. 结合律: $(a * b) * c = a * (b * c)$;
3. 存在单位元: 存在 $e \in G$, 使得对任意的 $a \in G$ 都有 $e * a = a * e = a$;
4. 存在逆元: 对任意的 $a \in G$, 都存在 $b \in G$, 使得 $a * b = b * a = e$, 其中 e 是单位元。

那么称 $(G, *)$ 是一个群, 简称群 G 。

定义 4.1.2 (阿贝尔群 Abelian Group). 如果一个群 $(G, *)$, 任意的 $a, b \in G$ 还满足:

1. 交换律: $a * b = b * a$,

那么称 $(G, *)$ 是一个阿贝尔群或交换群 (Commutative Group)。

注解

群的四条性质称为群公理。如果只满足前两条性质, 那么称为半群 (Semigroup)。如果只满足前三条性质, 那么称为幺半群 (Monoid)。只含有单位元的群 $G = \{e\}$ 称为平凡群 (Trivial Group), 反之为非平凡群 (Non-trivial Group)。比如, 整数集 \mathbb{Z} 关于加法构成一个阿贝尔群 $(\mathbb{Z}, +)$, 称为整数加群; $n\mathbb{Z} = \{nk : k \in \mathbb{Z}\}$ 表示自然数的 n 的整数被构成的集合, $(n\mathbb{Z}, +)$ 是一个阿贝尔群; 去零实数集 $\mathbb{R} \setminus \{0\}$ 关于乘法也构成一个阿贝尔群 $(\mathbb{R} \setminus \{0\}, *)$, 称为去零实数乘群。

定义 4.1.3 (群的阶). 设 $(G, *)$ 是一个群, 如果 G 是有限集, 那么称 G 的元素个数为群的阶, 记为 $|G|$ 。如果 G 是无限集, 那么称 G 的阶为无穷, 记为 $|G| = \infty$ 。

命题 4.1.1 (群运算的性质). 设 $(G, *)$ 是一个群, $a, b, c \in G$, 那么:

1. 单位元是唯一的;
2. 逆元是唯一的;
3. $(a^{-1})^{-1} = a$;
4. $(a * b)^{-1} = b^{-1} * a^{-1}$.
5. 左消去律: 如果 $a * b = a * c$, 那么 $b = c$;
6. 右消去律: 如果 $b * a = c * a$, 那么 $b = c$.

4.1.2 子群

定义 4.1.4 (子群 Subgroup). 设 $(G, *)$ 是一个群, $H \subseteq G$, 如果 H 本身也是一个群, 那么称 H 是 G 的子群, 记为 $H \leq G$. $\{e\}$ 和 G 都是 G 的子群, 称为平凡子群 (Trivial Subgroup), 其他的子群称为非平凡子群 (Non-trivial Subgroup)。

定理 4.1.1 (子群判定定理). 设 $(G, *)$ 是一个群, $H \subseteq G$, 如果 H 是 G 的子群, 当且仅当,

1. $e \in H$
2. 对任意的 $a, b \in H$, 都有 $a * b^{-1} \in H$

注解

子群是原群的一个子集, 它继承了原群的代数结构, 包括代数运算和代数常数。

4.1.3 群同态与群同构

定义 4.1.5 (群同态与群同构 Group Homomorphism and Isomorphism). 设 $(G, *)$ 和 (H, \cdot) 是两个群, 映射 $f: G \rightarrow H$ 称为从 G 到 H 的一个群同态, 当且仅当, 对任意的 $a, b \in G$, 都有

$$f(a * b) = f(a) \cdot f(b)$$

如果 f 是单射, 则称 f 为**单同态 Monomorphism**; 如果 f 是满射, 则称 f 为**满同态 Epimorphism**; 如果 f 是双射, 则称 f 为**群同构 Isomorphism**, 两个同构的群记为 $G \cong H$ 。

命题 4.1.2 (群同态的性质). 设 $(G, *)$ 和 (H, \cdot) 是两个群, 映射 $f: G \rightarrow H$ 是从 G 到 H 的一个群同态, 那么:

1. $f(e_G) = e_H$, 其中 e_G 和 e_H 分别是 G 和 H 的单位元
2. 对任意的 $a \in G$, 都有 $f(a^{-1}) = (f(a))^{-1}$

注解

群同态是保持群结构的映射, 还将单位元与单位元对应、逆元与逆元对应; 而群同构还将两个群的所有元素一一对应起来, 说明它们在群结构上是完全相同的。如果仅仅研究群的结构, 那么同构的群可以看成是同一个群。

定义 4.1.6 (群同态的核 Kernel). 设 $(G, *)$ 和 (H, \cdot) 是两个群, 映射 $f: G \rightarrow H$ 是从 G 到 H 的一个群同态, 那么称

$$\ker f = \{g \in G : f(g) = e_H\}$$

为群同态 f 的核, 其中 e_H 是群 H 的单位元。

命题 4.1.3. 设 $f: G \rightarrow H$ 是一个群同态, 那么 $\ker f \leq G$ 。

注解

群同态的核表示与另一个群单位元对应的群元素的集合, 也可以看成使方程 $f(g) = e_H$ 成立的群元素的集合, 它是原群的一个子群。

4.1.4 群的直和

定义 4.1.7 (群的直和 Direct Sum). 设 (A, \circ) 和 $(B, *)$ 是两个群, 定义集合:

$$A \oplus B := \{(a, b) \in A \times B : a \in A, b \in B\}$$

在 $A \oplus B$ 上定义二元运算:

$$(a_1, b_1) + (a_2, b_2) = (a_1 \circ a_2, b_1 * b_2)$$

那么 $(A \oplus B, +)$ 满足群的四条公理:

1. 封闭性: $\forall (a_1, b_1), (a_2, b_2) \in A \oplus B$, 都有 $(a_1, b_1) + (a_2, b_2) = (a_1 \circ a_2, b_1 * b_2) \in A \oplus B$;
2. 结合律: $\forall (a_1, b_1), (a_2, b_2), (a_3, b_3) \in A \oplus B$, 都有

$$((a_1, b_1) + (a_2, b_2)) + (a_3, b_3) = (a_1 \circ (a_2 \circ a_3), b_1 * (b_2 * b_3)) = (a_1, b_1) + ((a_2, b_2) + (a_3, b_3))$$

3. 单位元: (e_A, e_B) , 其中 e_A 和 e_B 分别是 A 和 B 的单位元;

4. 存在逆元: $\forall (a, b) \in A \oplus B$, 都有 $(a, b)^{-1} = (a^{-1}, b^{-1})$ 。

那么 $(A \oplus B, +)$ 是一个群, 称为群 A 和群 B 的直和。类似地, 可以定义有限多个群的直和:

$$\bigoplus_{i=1}^n G_i := G_1 \oplus G_2 \oplus \cdots \oplus G_n$$

$(\bigoplus_{i=1}^n G_i, +)$ 也是一个群, 称为群 G_1, G_2, \dots, G_n 的直和。

注解

群的直和是通过将多个群的元素组合成有序对来构造的新群。

4.1.5 群作用

定义 4.1.8 (群作用 Group Action). 设 $(G, *)$ 是一个群, X 是一个非空集合, 函数 $f: G \times X \rightarrow X$ 称为群作用, 当且仅当,

1. 单位元不动: $\forall x \in X, f(e, x) = x$, 其中 e 是 G 的单位元;
2. 结合律: $\forall g_1, g_2 \in G, \forall x \in X, f(g_1 * g_2, x) = f(g_1, f(g_2, x))$

定义 4.1.9 (轨道 Orbit). 设 $(G, *)$ 是一个群, X 是一个非空集合, 定义集合:

$$\text{Orb}(x) := \{f(g, x) : g \in G\}, \quad \forall x \in X$$

称为轨道。表示在群作用下, 能够遍历到的 X 中的元素。

注解

群作用是一个非常宽泛的框架, 群作用到一个非空集合上, 表示把集合中的元素进行某种变换, 并且这种变换满足群公理。比如, 在微分流形中 $(\mathbb{R}, +)$ 群作用到一个微分流形上 M 可以定义一个单参变换群, 可以刻画流形上点的平移; 轨道 $\text{Orb}(x)$ 表示一条 M 上一条光滑的曲线。

4.1.6 幂运算与循环群

定义 4.1.10 (群元素的自然数次幂运算). 设 $(G, *)$ 是一个群, $a \in G$, 则 a 的自然数次幂运算定义为:

1. $a^0 = e$;
2. $a^n = a^{n-1} * a, n > 0$

定义 4.1.11 (群元素的负整数次幂运算). 设 $(G, *)$ 是一个群, $n \in \mathbb{N}^+$ 是正整数, $a \in G$ 的 $-n$ 次幂记为 a^{-n} , 定义

$$a^{-n} = (a^n)^{-1} = (a^{-1})^n$$

命题 4.1.4 (群元素的整数次幂运算的性质). 设 $(G, *)$ 是一个群, $m, n \in \mathbb{Z}, a \in G$, 那么:

1. $a^{m+n} = a^m * a^n$;
2. $(a^m)^n = a^{mn}$;
3. 如果 $(G, *)$ 是阿贝尔群, 那么 $(a * b)^n = a^n * b^n$

注解

整数加群 $(\mathbb{Z}, +)$ 元素的整数次幂运算就是整数的乘法运算。去零实数乘群 $(\mathbb{R} \setminus \{0\}, *)$ 元素的整数次幂运算就是实数的乘方运算。

定义 4.1.12 (循环群 Cyclic Group). 设 $(G, *)$ 是一个群, $a \in G$, 如果 $G = \{a^n : n \in \mathbb{Z}\}$, 那么称 G 是由 a 生成的循环群, 记为 $\langle a \rangle$ 。 a 称为循环群的生成元。

定义 4.1.13 (模 n 剩余类加群). 设 \mathbb{Z} 是整数集, 设等价关系:

$$\forall a, b \in \mathbb{Z}, a \equiv b \iff a \bmod n = b \bmod n$$

称为同余关系。等价类:

$$[a] = \{b \in \mathbb{Z} : b \equiv a\}$$

也就与 a 同余的整数划到同一个等价类中。令 $\mathbb{Z}_n = \{[0], [1], \dots, [n-1]\}$, 称为模 n 剩余类集合。定义加法运算:

$$[a] + [b] = [a + b]$$

那么 $(\mathbb{Z}_n, +)$ 是一个群, 称为模 n 剩余类加群。

命题 4.1.5 (循环群的性质). 设 $(G, *)$ 是一个循环群, $a \in G$, 是生成元, 那么:

1. $(G, *)$ 是阿贝尔群;
2. 循环群的生成元不止一个, 如果 a 是生成元, 那么 a^{-1} 也是生成元;
3. 循环群的子群也是循环群;
4. 如果 $|G| = n$ 是有限的, 那么对任意的 $k \in \mathbb{Z}$, 都有 $a^{k+n} = a^k$; n 是循环群的阶, 也是生成元的循环周期;
5. 任意一个无限循环群都与 $(\mathbb{Z}, +)$ 同构; 任意一个 n 阶有限循环群都与 $(\mathbb{Z}_n, +)$ 同构。

注解

循环群是一种特殊的群, 其中的任意一个元素都可由生成元的整数次幂运算得到。比如, 整数加群 $(\mathbb{Z}, +)$ 是由 1 或 -1 生成的无限循环群; 模 n 剩余加群 $(\mathbb{Z}_n, +)$ 是有限循环群, $[1]$ 和 $[n-1]$ 是它的生成元, 且 $|\mathbb{Z}_n| = n$ 。去零整数乘群 $(\mathbb{Z} \setminus \{0\}, *)$ 不是循环群, 因为它没有生成元。

4.1.7 变换与变换群

定义 4.1.14 (变换 Transformation). 设 X 是一个非空集合, 映射 $f: X \rightarrow X$ 称为 X 上的一个变换, 当且仅当, f 是双射。

注解

变换是一种特殊的函数, 是集合到自身的双射。比如, 旋转和平移都可以看成是几何空间的变换。

定义 4.1.15 (变换群 Transformation Group). 设 X 是一个非空集合, S_X 是 X 上所有变换的集合, 定义二元运算为映射的复合, 满足:

1. 封闭性: 对任意的 $f, g \in S_X$, 都有 $f \circ g \in S_X$;
2. 结合律: 对任意的 $f, g, h \in S_X$, 都有 $(f \circ g) \circ h = f \circ (g \circ h)$;
3. 存在单位元: 存在恒等映射 $\text{id}_X \in S_X$, 使得对任意的 $f \in S_X$, 都有 $\text{id}_X \circ f = f \circ \text{id}_X = f$;

4. 存在逆元: 对任意的 $f \in S_X$, 都存在 $f^{-1} \in S_X$, 使得 $f \circ f^{-1} = f^{-1} \circ f = \text{id}_X$ 。

那么 (S_X, \circ) 是一个群, 称为 X 上的变换群。

注解

变换群是一种重要的群, 变换群中的元素是集合到自身的双射, 群运算是映射的复合。变换群在数学和物理学中有广泛的应用。有限集合上的变换群是对称群, 置换群是对称群的子群, 其中的变换称为置换。线性群是线性空间上线性变换构成的群, 它是线性空间上变换群的子群。

4.1.8 置换与置换群

定义 4.1.16 (置换 Permutation). 设 X 是一个非空有限集合, 双射函数 $f: X \rightarrow X$ 称为 X 上的一个置换。若 $f(x) = x$ 称为恒等置换, 记为 id_X 。

注解

在组合数学中, 置换指对一组元素重新排列。

定义 4.1.17 (对称群 Symmetric Group). 设 X 是一个非空有限集合, $|X| = n$, 设 $\text{Sym}(X)$ 是 X 上所有置换的集合, 定义二元运算为映射的复合, 满足:

1. 封闭性: 对任意的 $f, g \in \text{Sym}(X)$, 都有 $f \circ g \in \text{Sym}(X)$;
2. 结合律: 对任意的 $f, g, h \in \text{Sym}(X)$, 都有 $(f \circ g) \circ h = f \circ (g \circ h)$;
3. 存在单位元: 存在恒等映射 $\text{id}_X \in \text{Sym}(X)$, 使得对任意的 $f \in \text{Sym}(X)$, 都有 $\text{id}_X \circ f = f \circ \text{id}_X = f$;
4. 存在逆元: 对任意的 $f \in \text{Sym}(X)$, 都存在 $f^{-1} \in \text{Sym}(X)$, 使得 $f \circ f^{-1} = f^{-1} \circ f = \text{id}_X$ 。

那么, $(\text{Sym}(X), \circ)$ 是一个群, 称为 X 上的一般对称群。

命题 4.1.6. 设 X 是一个非空有限集合, $|X| = n$, 那么 X 上的对称群 $(\text{Sym}(X), \circ)$ 的阶为 $|\text{Sym}(X)| = n!$ 。

定义 4.1.18 (置换群 Permutation Group). 设 X 是一个非空有限集合, $G \leq \text{Sym}(X)$, 那么称 G 是 X 上的置换群。

例 4.1.1. 有限集合 $X = \{1, 2, 3\}$ 上的置换有 $3! = 6$ 个, 分别是:

$$\begin{aligned} \text{id}_X &= \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1 & 2 & 3 \end{pmatrix}, & f_1 &= \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1 & 3 & 2 \end{pmatrix}, & f_2 &= \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 1 & 3 \end{pmatrix}, \\ f_3 &= \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 3 & 1 \end{pmatrix}, & f_4 &= \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 3 & 1 & 2 \end{pmatrix}, & f_5 &= \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 3 & 2 & 1 \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

那么 $\text{Sym}(X) = \{\text{id}_X, f_1, f_2, f_3, f_4, f_5\}$ 是一个对称群, 其中

1. 存在单位元: id_X

2. 存在逆元:

$$(a) \text{id}_X^{-1} = \text{id}_X$$

$$(b) f_1^{-1} = f_1$$

$$(c) f_2^{-1} = f_2$$

$$(d) f_3^{-1} = f_4$$

$$(e) f_4^{-1} = f_3$$

$$(f) f_5^{-1} = f_5$$

3. 结合律: $(f_i \circ f_j) \circ f_k = f_i \circ (f_j \circ f_k)$, $i, j, k = 1, 2, 3, 4, 5$

那么 $|\text{Sym}(X)| = |X|! = 6$ 。其中, $\{\text{id}_X, f_1\}$, $\{\text{id}_X, f_5\}$, $\{\text{id}_X, f_3, f_4\}$ 都是 $\text{Sym}(X)$ 的非平凡子群, 是置换群。

4.1.9 线性变换与线性群

定义 4.1.19 (线性变换 Linear Transformation). 设 V 是域 F 上的 n 维线性空间, 双射 $L: V \rightarrow V$ 称为 V 上的一个线性变换, 当且仅当, 对任意的 $\mathbf{u}, \mathbf{v} \in V$ 和 $a, b \in F$, 都有

$$L(a\mathbf{u} + b\mathbf{v}) = aL(\mathbf{u}) + bL(\mathbf{v})$$

定义 4.1.20 (一般线性群 General Linear Group). 设 V 是域 F 上的 n 维线性空间, $\text{GL}_n(F)$ 是 V 上所有线性变换的集合, 定义二元运算为映射的复合, 满足:

1. 封闭性: 对任意的 $L_1, L_2 \in \text{GL}_n(F)$, 都有 $L_1 \circ L_2 \in \text{GL}_n(F)$;

2. 结合律: 对任意的 $L_1, L_2, L_3 \in \text{GL}_n(F)$, 都有 $(L_1 \circ L_2) \circ L_3 = L_1 \circ (L_2 \circ L_3)$;

3. 存在单位元: 存在恒等映射 $\text{id}_V \in \text{GL}_n(F)$, 使得对任意的 $L \in \text{GL}_n(F)$, 都有 $\text{id}_V \circ L = L \circ \text{id}_V = L$;

4. 存在逆元: 对任意的 $L \in \text{GL}_n(F)$, 都存在 $L^{-1} \in \text{GL}_n(F)$, 使得 $L \circ L^{-1} = L^{-1} \circ L = \text{id}_V$ 。

那么 $(\text{GL}_n(F), \circ)$ 是一个群, 称为 V 上的一般线性群。

注解

在 n 维线性空间中, 线性变换可以表示为 $n \times n$ 的可逆矩阵。那么一般线性群 $\text{GL}_n(F)$ 也可以表示为所有 $n \times n$ 可逆矩阵构成的群, 群运算为矩阵乘法。一般线性群是线性空间 V 上变换群的子群 $\text{GL}_n(F) \leq S_V$ 。

定义 4.1.21 (特殊线性群 Special Linear Group). 设 V 是域 F 上的 n 维线性空间, $\text{SL}_n(F)$ 是 V 上所有行列式为 1 的 $n \times n$ 矩阵构成的集合, 二元运算为矩阵乘法, 那么 $(\text{SL}_n(F), \cdot)$ 是一个群, 称为 V 上的特殊线性群。

注解

行列式为 1, 说明该线性变换不拉伸空间 (在一维空间中能保证长度不变, 在二维空间中能保证面积不变, 在三维空间中能保证体积不变)。特殊线性群是一般线性群的子群 $SL_n(F) \leq GL_n(F)$ 。

定义 4.1.22 (正交矩阵 Orthogonal Matrix). 设 V 是实数域 \mathbb{R} 上的 n 维线性空间, A 是 V 上的一个 $n \times n$ 矩阵, 如果 A 满足

$$A^T A = A A^T = I$$

其中, A^T 是 A 的转置矩阵, 那么称 A 是一个正交矩阵。

定义 4.1.23 (正交群 Orthogonal Group). 设 V 是实数域 \mathbb{R} 上的 n 维线性空间, O_n 是 V 上所有正交矩阵构成的集合, 二元运算为矩阵乘法, 那么 (O_n, \cdot) 是一个群, 称为 V 上的正交群。

定义 4.1.24 (特殊正交群 Special Orthogonal Group). 设 V 是实数域 \mathbb{R} 上的 n 维线性空间, SO_n 是 V 上所有行列式为 1 的正交矩阵构成的集合, 二元运算为矩阵乘法, 那么 (SO_n, \cdot) 是一个群, 称为 V 上的特殊正交群。

注解

正交矩阵表示的线性变换能保持向量间的夹角不变。正交变换群是一般线性群的子群。特殊正交矩阵表示的旋转变换。特殊正交矩阵群即是特殊线性群的子群, 又是正交变换群的子群 $SO_n \leq O_n \leq SL_n(\mathbb{R}) \leq GL_n(\mathbb{R})$ 。

定义 4.1.25 (酉矩阵 Unitary Matrix). 设 V 是复数域 \mathbb{C} 上的 n 维线性空间, A 是 V 上的一个 $n \times n$ 矩阵, 如果 A 满足

$$A^\dagger A = A A^\dagger = I$$

其中, $A^\dagger = \overline{A^T}$ 是 A 的共轭转置矩阵, 那么称 A 是一个酉矩阵。

定义 4.1.26 (酉群 Unitary Group). 设 V 是复数域 \mathbb{C} 上的 n 维线性空间, U_n 是 V 上所有酉矩阵构成的集合, 二元运算为矩阵乘法, 那么 (U_n, \cdot) 是一个群, 称为 V 上的酉群。

定义 4.1.27 (特殊酉群 Special Unitary Group). 设 V 是复数域 \mathbb{C} 上的 n 维线性空间, SU_n 是 V 上所有行列式为 1 的酉矩阵构成的集合, 二元运算为矩阵乘法, 那么 (SU_n, \cdot) 是一个群, 称为 V 上的特殊酉群。

注解

酉矩阵是正交矩阵在复数域上的推广。酉矩阵表示的线性变换能保持复向量间的夹角不变。酉变换群是一般线性群的子群。特殊酉矩阵表示的旋转变换。特殊酉矩阵群即是特殊线性群的子群, 又是酉变换群的子群 $SU_n \leq U_n \leq SL_n(\mathbb{C}) \leq GL_n(\mathbb{C})$ 。

4.1.10 陪集与群划分

定义 4.1.28 (左陪集 Left Coset). 设 $(G, *)$ 是一个群, $H \leq G$ 是 G 的子群. 定义 G 上的等价关系 \sim 为:

$$a \sim b \iff a^{-1}b \in H, \quad \forall a, b \in G$$

等价类:

$$\begin{aligned} [a]_{\sim} &= \{x \in G : x \sim a\} = \{x \in G : a^{-1}x \in H\} \\ &= \{x \in G : a^{-1}x = h, h \in H\} \\ &= \{x \in G : x = ah, h \in H\} \\ &= \{ah : h \in H\} \end{aligned}$$

记为 $aH := [a]_{\sim}$, 称为 H 关于 a 的左陪集。

定义 4.1.29 (左商集 Left Quotient Set). 设 $(G, *)$ 是一个群, $H \leq G$ 是 G 的子群, $a \in G$, 那么 G 关于 H 的所有左陪集的集合称为 G 关于 H 的左商集, 记为 $(G/H)_l$, 即

$$(G/H)_l := \{aH : a \in G\}$$

定义 4.1.30 (右陪集 Right Coset). 设 $(G, *)$ 是一个群, $H \leq G$ 是 G 的子群. 定义 G 上的等价关系 \sim 为:

$$a \sim b \iff ab^{-1} \in H, \quad \forall a, b \in G$$

等价类:

$$\begin{aligned} [a]_{\sim} &= \{x \in G : x \sim a\} = \{x \in G : ax^{-1} \in H\} \\ &= \{x \in G : ax^{-1} = h, h \in H\} \\ &= \{x \in G : x = ha, h \in H\} \\ &= \{ha : h \in H\} \end{aligned}$$

记为 $Ha := [a]_{\sim}$, 称为 H 关于 a 的右陪集。

定义 4.1.31 (右商集 Right Quotient Set). 设 $(G, *)$ 是一个群, $H \leq G$ 是 G 的子群, $a \in G$, 那么 G 关于 H 的所有右陪集的集合称为 G 关于 H 的右商集, 记为 $(G/H)_r$, 即

$$(G/H)_r := \{Ha : a \in G\}$$

例 4.1.2. 整数加群 $(\mathbb{Z}, +)$ 关于 $(3\mathbb{Z}, +)$ 的所有左陪集:

$$\begin{aligned} 0 + 3\mathbb{Z} &= \{\dots, -6, -3, 0, 3, 6, \dots\} \\ 1 + 3\mathbb{Z} &= \{\dots, -5, -2, 1, 4, 7, \dots\} \\ 2 + 3\mathbb{Z} &= \{\dots, -4, -1, 2, 5, 8, \dots\} \end{aligned}$$

$(\mathbb{Z}, +)$ 关于 $(3\mathbb{Z}, +)$ 的所有左商集:

$$(\mathbb{Z}/3\mathbb{Z})_l = \{0 + 3\mathbb{Z}, 1 + 3\mathbb{Z}, 2 + 3\mathbb{Z}\}$$

同样可以得到 $(\mathbb{Z}, +)$ 关于 $(3\mathbb{Z}, +)$ 的所有右陪集:

$$3\mathbb{Z} + 0 = \{\dots, -6, -3, 0, 3, 6, \dots\}$$

$$3\mathbb{Z} + 1 = \{\dots, -5, -2, 1, 4, 7, \dots\}$$

$$3\mathbb{Z} + 2 = \{\dots, -4, -1, 2, 5, 8, \dots\}$$

$(\mathbb{Z}, +)$ 关于 $(3\mathbb{Z}, +)$ 的所有右商集:

$$(\mathbb{Z}/3\mathbb{Z})_r = \{3\mathbb{Z} + 0, 3\mathbb{Z} + 1, 3\mathbb{Z} + 2\}$$

注解

左(右)陪集将群划分为若干个等价类, 这些等价类构成的商集是群 G 的一个划分 Partition。左陪集和右陪集的定义类似, 但它们的元素排列顺序不同。一般情况下, 左陪集和右陪集不相等, 但如果子群是正规子群, 那么左陪集和右陪集相等。

命题 4.1.7 (陪集的性质). 设 $(G, *)$ 是一个群, $H \leq G$ 是 G 的子群, $a, b \in G$, 那么:

1. 左商集中, $eH = H$
2. 右商集合, $He = H$
3. 左商集中, $\forall a, b \in G (aH = bH \leftrightarrow a^{-1}b \in H)$
4. 右商集中, $\forall a, b \in G (Ha = Hb \leftrightarrow ba^{-1} \in H)$
5. 左商集中, $\forall a, b \in G (a \neq b \rightarrow aH \cap bH = \emptyset)$
6. 右商集中, $\forall a, b \in G (a \neq b \rightarrow Ha \cap Hb = \emptyset)$
7. 存在一个双射 $f: H \rightarrow aH$, 使得 $\forall h \in H (f(h) = ah)$; 换句话说, 左陪集与子群 H 具有相同的势
8. 存在一个双射 $f: H \rightarrow Ha$, 使得 $\forall h \in H (f(h) = ha)$; 换句话说, 右陪集与子群 H 具有相同的势
9. 存在一个双射 $f: (G/H)_l \rightarrow (G/H)_r$, 使得 $\forall a \in G (f(aH) = Ha)$; 换句话说, 左商集和右商集具有相同的势。

定义 4.1.32 (指数 Index). 设 $(G, *)$ 是一个群, $H \leq G$ 是 G 的子群。如果左右陪集是有限集, 那么左右商集的势称为群 G 关于子群 H 的指数, 记为 $[G : H]$, 即

$$[G : H] = |(G/H)_l| = |(G/H)_r|$$

定理 4.1.2 (拉格朗日定理 Lagrange's Theorem). 设 $(G, *)$ 是一个有限群, $H \leq G$ 是 G 的子群, 那么

$$|G| = [G : H] \cdot |H|$$

证明. 设 H 关于 G 的所有左陪集为 a_1H, a_2H, \dots, a_kH , 其中 $k = [G : H]$, 那么

$$G = a_1H \cup a_2H \cup \dots \cup a_kH$$

且 $a_iH \cap a_jH = \emptyset, i \neq j$. 又因为对任意的 $a \in G$, 都有 $|aH| = |H|$, 所以

$$|G| = |a_1H| + |a_2H| + \dots + |a_kH| = k|H| = [G : H] \cdot |H|$$

□

注解

拉格朗日定理说明了有限群的阶与其子群的阶之间的关系。它表明, 有限群的阶总是其任意子群的阶的整数倍。在例 4.1.1 中, $H = \{\text{id}_X, f_1\} \leq \text{Sym}(X)$, 那么左商集:

$$(\text{Sym}(X)/H)_l = \{H, f_2H, f_3H\} = \{\{\text{id}_X, f_1\}, \{f_2, f_4\}, \{f_3, f_5\}\}$$

那么 $|\text{Sym}(X)| = |H| \cdot |(\text{Sym}(X)/H)_l| = 2 \cdot 3 = 6$ 。

4.1.11 正规子群与商群

定义 4.1.33 (共轭 Conjugate). 设 $(G, *)$ 是一个群, $a, b \in G$, 如果存在 $g \in G$, 使得:

$$b = g^{-1} * a * g$$

那么称 b 是 a 的一个共轭。

定义 4.1.34 (正规子群 Normal Subgroup). 设 $(G, *)$ 是一个群. $H \leq G$ 是 G 的正规子群, 当且仅当,

$$\forall g \in G, \{g^{-1}hg : h \in H\} = H$$

记为 $H \triangleleft G$ 。

命题 4.1.8. 设 $(G, *)$ 是一个群, $H \leq G$ 是 G 的子群, 那么以下命题等价:

1. $H \triangleleft G$
2. $\forall g \in G, gHg^{-1} = H$
3. $\forall g \in G, gH = Hg$
4. 存在群同态 $f: G \rightarrow G'$, 使得 $\ker(f) = H$

命题 4.1.9. 所有的交换群的子群都是正规子群。

证明. 设 $(G, *)$ 是一个交换群, $H \leq G$ 是 G 的子群, $\forall g \in G$, 那么

$$\begin{aligned} \{g^{-1} * h * g : h \in H\} &= \{h * g^{-1} * g : h \in H\} \\ &= \{h * e : h \in H\} = \{h : h \in H\} = H \end{aligned}$$

所以 $H \triangleleft G$ 。

□

注解

例 4.1.2 中, 整数加群 $(\mathbb{Z}, +)$ 是交换群, $3\mathbb{Z} \leq \mathbb{Z}$, 所以 $3\mathbb{Z} \triangleleft \mathbb{Z}$ 。

定义 4.1.35 (商群 Quotient Group). 设 $(G, *)$ 是一个群, $H \triangleleft G$ 是 G 的正规子群, 定义商集:

$$G/H := (G/H)_l = (G/H)_r = \{aH : a \in G\} = \{Ha : a \in G\}$$

在商集 G/H 上定义二元运算:

$$(aH) \circ (bH) = (a * b)H$$

那么 $(G/H, \circ)$ 满足群的四条公理:

1. 封闭性: $\forall aH, bH \in G/H$, 都有 $(aH) \circ (bH) = (a * b)H \in G/H$;

2. 结合律: $\forall aH, bH, cH \in G/H$, 都有

$$(aH \circ bH) \circ cH = (a * b)H \circ cH = ((a * b) * c)H = (a * (b * c))H = aH \circ (bH \circ cH)$$

3. 单位元: $eH = H$;

4. 存在逆元: $\forall aH \in G/H$, 都有 $(aH)^{-1} = a^{-1}H$;

那么 $(G/H, \circ)$ 是一个群, 称为 G 关于 H 的商群。

命题 4.1.10 (商群的性质). 设 $(G, *)$ 是一个群, $H \triangleleft G$ 是 G 的正规子群, 那么:

1. 如果 G 是有限群, 根据拉格朗日定理 4.1.2, 那么 $|G/H| = [G : H] = |G|/|H|$

2. 如果 G 是交换群, 那么 G/H 也是交换群

3. 如果 G 是循环群, 那么 G/H 也是循环群

例 4.1.3. 整数加群 $(\mathbb{Z}, +)$ 关于正规子群 $(3\mathbb{Z}, +)$ 的商集为:

$$\mathbb{Z}/3\mathbb{Z} = \{0 + 3\mathbb{Z}, 1 + 3\mathbb{Z}, 2 + 3\mathbb{Z}\}$$

定义加法运算:

$$(a + 3\mathbb{Z}) + (b + 3\mathbb{Z}) = (a + b) + 3\mathbb{Z}$$

满足群的四条公理:

1. 单位元 $0 + 3\mathbb{Z}$

2. 封闭性

$$(1 + 3\mathbb{Z}) + (2 + 3\mathbb{Z}) = 3 + 3\mathbb{Z} = 0 + 3\mathbb{Z}$$

$$(0 + 3\mathbb{Z}) + (1 + 3\mathbb{Z}) = (1 + 3\mathbb{Z})$$

$$(0 + 3\mathbb{Z}) + (2 + 3\mathbb{Z}) = (2 + 3\mathbb{Z})$$

3. 结合律

$$((1 + 3\mathbb{Z}) + (2 + 3\mathbb{Z})) + (0 + 3\mathbb{Z}) = (0 + 3\mathbb{Z}) + (0 + 3\mathbb{Z}) = 0 + 3\mathbb{Z}$$

$$(1 + 3\mathbb{Z}) + ((2 + 3\mathbb{Z}) + (0 + 3\mathbb{Z})) = (1 + 3\mathbb{Z}) + (2 + 3\mathbb{Z}) = 0 + 3\mathbb{Z}$$

4. 逆元

$$(1 + 3\mathbb{Z})^{-1} = 2 + 3\mathbb{Z}$$

$$(2 + 3\mathbb{Z})^{-1} = 1 + 3\mathbb{Z}$$

$$(0 + 3\mathbb{Z})^{-1} = 0 + 3\mathbb{Z}$$

那么 $(\mathbb{Z}/3\mathbb{Z}, +)$ 是一个群，且是循环群，生成元为 $1 + 3\mathbb{Z}$ 或 $2 + 3\mathbb{Z}$ ， $|\mathbb{Z}/3\mathbb{Z}| = 3$ 。

注解

商群是通过将群 G 的元素划分为若干个等价类（即陪集）来构造的新群。商群在群论中有重要的应用，比如在研究群的结构和分类时，商群提供了一种简化问题的方法。

4.1.12 群同态基本定理

定理 4.1.3 (第一同构定理 First Isomorphism Theorem). 设 $(G, *)$ 和 (G', \cdot) 是两个群， $f: G \rightarrow G'$ 是一个群同态，那么 $\ker(f) \triangleleft G$ ，且 $G/\ker(f) \cong \text{im}(f)$ 。

证明.

□

注解

群同态基本定理说明群的任一同态像，同构于原群关于同态核的商群。

定理 4.1.4 (第二同构定理 Second Isomorphism Theorem). 设 $(G, *)$ 是一个群， $H \leq G$ 是 G 的子群， $N \triangleleft G$ 是 G 的正规子群，那么 $HN \leq G$ ，且 $N \triangleleft HN$ ，并且

$$H/(H \cap N) \cong HN/N$$

证明.

□

定理 4.1.5 (第三同构定理 Third Isomorphism Theorem). 设 $(G, *)$ 是一个群， $H \triangleleft G$ 和 $N \triangleleft G$ 是 G 的两个正规子群，且 $H \subset N$ ，那么：

$$(G/H)/(N/H) \cong G/N$$

证明.

□

注解

群同态基本定理是群论的核心定理，它们建立了群同态、正规子群与商群之间的深刻联系。

4.2 环

4.2.1 环的基本概念

定义 4.2.1 (环 Ring). 设 R 是一个非空集合, $+$ 和 \cdot 是定义在 R 上的两种代数运算, 如果对任意 $a, b, c \in R$, 都有

1. $(R, +)$ 是一个交换群;

(a) 封闭性: $a + b \in R$;

(b) 结合律: $(a + b) + c = a + (b + c)$;

(c) 交换律: $a + b = b + a$;

(d) 存在加法单位元: 存在 $0 \in R$, 使得对任意 $a \in R$, 都有 $a + 0 = 0 + a = a$;

(e) 存在加法逆元: 对任意 $a \in R$, 存在 $-a \in R$, 使得 $a + (-a) = (-a) + a = 0$ 。

2. (R, \cdot) 是一个半群;

(a) 封闭性: $a \cdot b \in R$;

(b) 结合律: $(a \cdot b) \cdot c = a \cdot (b \cdot c)$ 。

3. 乘法对加法的分配律:

(a) 左分配律: $a \cdot (b + c) = a \cdot b + a \cdot c$;

(b) 右分配律: $(a + b) \cdot c = a \cdot c + b \cdot c$ 。

则称 $(R, +, \cdot)$ 是一个环, $+$ 和 \cdot 分别称为环的加法和乘法。如果 $R = \{0\}$, 则称 $(R, +, \cdot)$ 是一个平凡环 *Trivial Ring*; 否则称为非平凡环 *Non-trivial Ring*。

定义 4.2.2 (交换环 Commutative Ring). 设 $(R, +, \cdot)$ 为环。如果乘法 \cdot 满足交换律, 则称 $(R, +, \cdot)$ 为交换环。

定义 4.2.3 (无零因子环 Ring without Zero Divisors). 设 $(R, +, \cdot)$ 为环。如果对任意 $a, b \in R$, $a \neq 0$, $b \neq 0$, 均有 $a \cdot b \neq 0$, 则称环 $(R, +, \cdot)$ 为无零因子环。

定义 4.2.4 (含幺环 Ring with identity). 设 $(R, +, \cdot)$ 为环。如果存在乘法单位元 1 并且 $1 \neq 0$, 则称环 $(R, +, \cdot)$ 为含幺环。也即 (R, \cdot) 是幺半群, $(R, +, \cdot)$ 为含幺环。

定义 4.2.5 (整环 Integral Domain). 设 $(R, +, \cdot)$ 为含幺环。如果 $(R, +, \cdot)$ 是无零因子环, 则称 $(R, +, \cdot)$ 为整环。

定义 4.2.6 (除环 Division Ring). 设 $(R, +, \cdot)$ 为含幺环。如果对任意 $a \in R$, $a \neq 0$, 均存在 $a^{-1} \in R$, 使得 $a \cdot a^{-1} = a^{-1} \cdot a = e$, 则称 $(R, +, \cdot)$ 为除环。也即 $(R \setminus \{0\}, \cdot)$ 是群, $(R, +, \cdot)$ 为含幺环。

注解

环在交换群的基础上, 配备了第二代数运算——“乘法”, 并且乘法对加法满足分配律。对环乘法附加更多的结构, 可以得到交换环、含幺环、整环、除环等。比如, $(\mathbb{Z}, +, \cdot)$ 是一个整环; $(\mathbb{Q}, +, \cdot)$, $(\mathbb{R}, +, \cdot)$, $(\mathbb{C}, +, \cdot)$ 都是除环。

定义 4.2.7 (子环 Subring). 设 $(R, +, \cdot)$ 为环, $S \subseteq R$. 如果 $(S, +, \cdot)$ 也是环, 则称 S 为 R 的子环。 0 和 R 都是 R 的子环, 称为平凡子环 *Trivial subring*, 其他子环称为非平凡子环 *Non-trivial subring*。

定理 4.2.1 (子环判定定理). 设 $(R, +, \cdot)$ 为环, $S \subseteq R$. 则 S 是 R 的子环的充分必要条件是

1. $0 \in S$;
2. $\forall a, b \in S, a - b \in S$;
3. $\forall a, b \in S, a \cdot b \in S$.

注解

子环判定定理相比子群判定定理, 多了一个关于乘法封闭性的条件。

定义 4.2.8 (环同态与环同构 Ring Homomorphism and Isomorphism). 设 R 和 R' 为环。函数 $f: R \rightarrow R'$ 是一个环同态, 当且仅当,

1. $\forall a, b \in R, f(a + b) = f(a) + f(b)$;
2. $\forall a, b \in R, f(a \cdot b) = f(a) \cdot f(b)$;

如果函数 f 是单射, 则称 f 为单同态; 如果函数 f 是满射, 则称 f 为满同态; 如果映射 f 是双射, 则称 f 为环同构, 记为 $R \cong R'$ 。

定义 4.2.9 (环同态的核 Kernel of Ring Homomorphism). 设 R 和 R' 为环, $f: R \rightarrow R'$ 是一个环同态。定义集合:

$$\ker f := \{a \in R : f(a) = 0 \in R'\}$$

称为环同态 f 的核。

命题 4.2.1 (环同态的性质). 设 R 和 R' 为环, $f: R \rightarrow R'$ 是一个环同态。则

1. $f(0) = 0$;
2. $\forall a \in R, f(-a) = -f(a)$;
3. $\ker f \leq R$

注解

环同态与群同态类似, 都是保持代数结构的映射。环同态的核表示与另一个环 0 元对应的环元素的集合, 它是原环的一个子环。

4.2.2 多项式环

定义 4.2.10 (多项式 Polynomial). 设 $(R, +, \cdot)$ 为环, 定义多项式:

$$a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \cdots + a_1 x + a_0$$

其中, x 称为变量, $a_i \in R$ 称为系数, $n \in \mathbb{N}$ 称为次数。如果 $a_n \neq 0$ 称为变量 x 的 n 次多项式。如果 $a_0 = a_1 = \cdots = a_n = 0$, 称为 0 多项式。全体系数在环 R 上的所有多项式的集合, 记为 $R[x]$ 。

定义 4.2.11 (等于关系). 设 $(R, +, \cdot)$ 为环, $f, g \in R[x]$ 相等, 记为 $f = g$, 当且仅当 f 和 g 的对应系数相等。

定义 4.2.12 (多项式环 Polynomial Ring). 设 $(R, +, \cdot)$ 为环, $R[x]$ 为全体系数在 R 上的所有多项式的集合。定义 $R[x]$ 上的加法和乘法如下:

1. 多项式加法: 设 $f(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \cdots + a_1 x + a_0$, $g(x) = b_m x^m + b_{m-1} x^{m-1} + \cdots + b_1 x + b_0$, 其中 $a_i, b_j \in R$, 则

$$f(x) + g(x) = \sum_{k=0}^{\max(n,m)} (a_k + b_k) x^k$$

2. 多项式乘法: 设 $f(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \cdots + a_1 x + a_0$, $g(x) = b_m x^m + b_{m-1} x^{m-1} + \cdots + b_1 x + b_0$, 其中 $a_i, b_j \in R$, 则

$$f(x) \cdot g(x) = \sum_{k=0}^{n+m} c_k x^k$$

其中,

1. $a_i = 0$ 当 $i > n$ 或 $i < 0$;
2. $b_j = 0$ 当 $j > m$ 或 $j < 0$;
3. $c_k = \sum_{i=0}^k a_i b_{k-i}$ 。

则 $(R[x], +, \cdot)$ 满足环公理, 称为 R 上的多项式环。

4.2.3 理想与商环

环 $(R, +, \cdot)$ 的 $(R, +)$ 是一个交换群, 其所有子群都是正规子群。而 (R, \cdot) 只是一个半群, 无法定义乘法的正规子群, 我们可以类似地定义一种特殊的子环——理想子环, 相关的结论与正规子群中的结论有相似性。

定义 4.2.13 (左理想子环 Left Ideal). 设 $(R, +, \cdot)$ 为环, $I \leq R$ 。 I 是 R 的一个左理想子环, 当且仅当, $\forall r \in R, \forall i \in I, r \cdot i \in I$ 。

定义 4.2.14 (右理想子环 Right Ideal). 设 $(R, +, \cdot)$ 为环, $I \leq R$ 。 I 是 R 的一个右理想子环, 当且仅当, $\forall r \in R, \forall i \in I, i \cdot r \in I$ 。

定义 4.2.15 (理想子环 Ideal). 设 $(R, +, \cdot)$ 为环, $I \leq R$. I 是 R 的一个理想子环, 当且仅当, I 同时是 R 的一个左理想子环和右理想子环. 简称为理想。

定义 4.2.16 (理想的等价定义). 设 $(R, +, \cdot)$ 为环, $I \subset R$. I 是 R 的理想, 当且仅当,

1. $0 \in I$;
2. $\forall a, b \in I, a - b \in I$;
3. $\forall r \in R, \forall i \in I, r \cdot i \in I$ 且 $i \cdot r \in I$.

命题 4.2.2. 设 $(R, +, \cdot)$ 为环, 存在环同态 f , 使得 $I = \ker f$, 则 I 是 R 的一个理想。

证明. 设 $a, b \in I$, 则 $f(a) = 0, f(b) = 0$, 所以

$$f(a - b) = f(a) - f(b) = 0 - 0 = 0$$

因此 $a - b \in I$. 又设 $r \in R, i \in I$, 则 $f(i) = 0$, 所以

$$f(r \cdot i) = f(r) \cdot f(i) = f(r) \cdot 0 = 0$$

因此 $r \cdot i \in I$. 同理可证 $i \cdot r \in I$. 综上所述, I 是 R 的一个理想。 □

定义 4.2.17 (主理想 Principal Ideal). 设 $(R, +, \cdot)$ 为环, $a \in R$. 定义集合:

$$(a) := \{r \cdot a : r \in R\}$$

称为由 a 生成的主理想. 也即一个理想中所有的元素都可以依据子环判定定理生成, 那么它是主理想。

例 4.2.1. 设 $(\mathbb{Z}, +, \cdot)$ 为整数环, $2\mathbb{Z} = \{\dots, -4, -2, 0, 2, 4, \dots\}$ 是 \mathbb{Z} 的一个理想. 因为

1. $0 \in 2\mathbb{Z}$;
2. $\forall a, b \in 2\mathbb{Z}, a - b \in 2\mathbb{Z}$;
3. $\forall r \in \mathbb{Z}, \forall i \in 2\mathbb{Z}, r \cdot i \in 2\mathbb{Z}$ 且 $i \cdot r \in 2\mathbb{Z}$.

$(\mathbb{Z}, +, \cdot)$ 的所有理想都是主理想, 并且 $n\mathbb{Z} = (n)$.

注解

理想是环的一个特殊子环, 类似于群的正规子群. 理想的定义中, 除了满足子环的条件外, 还要求对任意环元素与理想元素的乘积仍在理想中. 如果 R 是交换环, 则 I 是 R 的左理想子环、右理想子环和理想是等价的。

定义 4.2.18 (商环 Quotient Ring). 设 $(R, +, \cdot)$ 为环, I 是 R 的理想. 定义集合:

$$R/I := \{a + I : a \in R\}$$

其中, $a + I := \{a + i : i \in I\}$. 在 R/I 上定义加法和乘法如下:

1. 加法: $\forall a + I, b + I \in R/I, (a + I) + (b + I) = (a + b) + I$;

2. 乘法: $\forall a + I, b + I \in R/I, (a + I) \cdot (b + I) = (a \cdot b) + I$ 。

则 $(R/I, +, \cdot)$ 满足环公理, 称为 R 关于理想 I 的商环。

命题 4.2.3 (商环的性质). 设 $(R, +, \cdot)$ 为环, I 是 R 的理想, 那么:

1. 如果 R 是交换环, 则 R/I 也是交换环;
2. 如果 R 是含幺环, 并且 $1 \in R$ 是乘法单位元, 则 R/I 也是含幺环, 且 $(1 + I)$ 是 R/I 的乘法单位元;
3. 如果 R 是除环, 并且 $I \neq \{0\}$, 则 R/I 也是除环, 那么 $a^{-1} + I$ 是 R/I 中的乘法逆元。

例 4.2.2. 设 $(\mathbb{Z}, +, \cdot)$ 为整数环, $2\mathbb{Z}$ 是 \mathbb{Z} 的一个理想。其中,

$$\begin{aligned} & \vdots \\ -2 + 2\mathbb{Z} &= \{\dots, -4, -2, 0, 2, 4, \dots\} = 0 + 2\mathbb{Z} \\ -1 + 2\mathbb{Z} &= \{\dots, -3, -1, 1, 3, 5, \dots\} = 1 + 2\mathbb{Z} \\ 0 + 2\mathbb{Z} &= \{\dots, -4, -2, 0, 2, 4, \dots\} \\ 1 + 2\mathbb{Z} &= \{\dots, -3, -1, 1, 3, 5, \dots\} \\ 2 + 2\mathbb{Z} &= \{\dots, -2, 0, 2, 4, 6, \dots\} = 0 + 2\mathbb{Z} \\ 3 + 2\mathbb{Z} &= \{\dots, -1, 1, 3, 5, 7, \dots\} = 1 + 2\mathbb{Z} \\ & \vdots \end{aligned}$$

那么

$$\mathbb{Z}/2\mathbb{Z} = \{0 + 2\mathbb{Z}, 1 + 2\mathbb{Z}\}$$

注解

商环的定义与商群类似, 都是将原代数结构划分为若干个等价类, 然后在等价类上定义新的代数运算。商环的结构与原环和理想密切相关。

4.2.4 环同态基本定理

定理 4.2.2 (第一同构定理 First Isomorphism Theorem for Rings). 设 $f: R \rightarrow R'$ 是一个环同态。那么 $\ker f$ 是 R 的一个理想, 并且 $R/\ker f \cong \text{Im} f$ 。

证明.

□

注解

环同态基本定理与群同态基本定理类似, 都是通过同态映射将原代数结构与其像联系起来。环同态基本定理说明环的任一同态像, 同构于原环关于同态核的商环。

定理 4.2.3 (第二同构定理 Second Isomorphism Theorem for Rings). 设 $(R, +, \cdot)$ 为环, I, J 是 R 的理想。那么

$$I/(I \cap J) \cong (I + J)/J$$

证明.

□

定理 4.2.4 (第三同构定理 Third Isomorphism Theorem for Rings). 设 $(R, +, \cdot)$ 为环, I, J 是 R 的理想, 并且 $I \subseteq J$ 。那么

$$(R/I)/(J/I) \cong R/J$$

证明.

□

4.3 域

4.3.1 域的基本概念

定义 4.3.1 (域 Field). 设 F 是一个非空集合, $+$ 和 \cdot 是定义在 F 上的两种代数运算. $(F, +, \cdot)$ 称为域, 当且仅当, $(F, +, \cdot)$ 是一个交换环并且是一个除环。

定义 4.3.2 (子域 Subfield). 设 F 是一个域, $K \subseteq F$. K 称为 F 的一个子域, 当且仅当, K 在 F 上关于加法和乘法是封闭的, 并且 $(K, +, \cdot)$ 也是一个域。

定理 4.3.1 (子域判定定理). 设 $(F, +, \cdot)$ 是一个域, $K \subseteq F$. 则 K 是 F 的子域的充分必要条件是:

1. $0, 1 \in K$;
2. $\forall a, b \in K, a - b \in K$;
3. $\forall a, b \in K \setminus \{0\}, a \cdot b^{-1} \in K$;

注解

域是在环的基础上, 添加了乘法交换律和乘法逆元存在性两个条件, 并且域中没有零因子。常见的, $(\mathbb{Q}, +, \cdot)$, $(\mathbb{R}, +, \cdot)$ 和 $(\mathbb{C}, +, \cdot)$ 都是域。 \mathbb{Q} 是 \mathbb{R} 的子域, \mathbb{R} 也是 \mathbb{C} 的子域。

4.3.2 域扩张

定义 4.3.3 (域扩张 Field Extension). 设 F 是一个域, 如果存在一个域 K , 使得 F 是 K 的一个子域, 则称 K 是 F 的一个域扩张, 记为 K/F 。

注解

域扩张是域论中的一个重要概念, 如何从一个小域构造出一个更大的域, 或者研究两个域之间的关系, 都是通过域扩张来实现的。

定义 4.3.4 (单扩域 Simple Extension). 设 F 是一个域, K/F 是 F 的一个域扩张。如果存在 $a \in K$, 使得 $K = F(a)$, 则称 K/F 是一个单扩域。这里 $F(a)$ 表示包含 F 和 a 的最小子域。

注解

单扩域在 K/F 所有子域中包含基域 F 和另一个元素 $a \in K$ 的最小子域。例如, $\mathbb{C} = \mathbb{R}(i) = \{a + bi : a, b \in \mathbb{R}\}$ 是 \mathbb{R} 的一个单扩域, 因为 \mathbb{C} 是包含 \mathbb{R} 和 i 的最小子域。另一个例子是 $\mathbb{Q}(\sqrt{2}) = \{a + b\sqrt{2} : a, b \in \mathbb{Q}\}$ 是 \mathbb{Q} 的一个单扩域, 因为它是包含 \mathbb{Q} 和 $\sqrt{2}$ 的最小子域。

定义 4.3.5 (分裂域 Splitting Field). 设 F 是一个域, $f(x) \in F[x]$ 是一个正次数多项式。如果存在一个域扩张 K/F , 使得 $f(x)$ 可以写成一系列在 $K[x]$ 中的一次多项式的乘积, 也即

$$f(x) = a(x - r_1)(x - r_2) \cdots (x - r_n), \quad a, r_1, r_2, \dots, r_n \in K,$$

并且 K 是包含所有 $f(x)$ 所有根的最小域, 则称 K 是 $f(x)$ 在 F 上的一个分裂域。

注解

在某个域上某个多项式方程可能没有解，因此希望通过构造一个更大的域，使得该多项式方程在这个更大的域中有解。分裂域就是这样一个更大的域，它是相对特定多项式而言的，它包含了多项式的所有根，并且是包含这些根的最小域。

定义 4.3.6 (有限扩张与无限扩张 Finite and Infinite Extensions). 设 K/F 是一个域扩张, K 作为 F 上的一个向量空间。如果 K 作为 F 上的向量空间是有限维的, 则称 K/F 是一个有限扩张, 否则称 K/F 是一个无限扩张。 K 的维数称为扩张的次数, 记为 $[K:F]$ 。

注解

\mathbb{C} 是 \mathbb{R} 的一个有限扩展, 并且 $\{1, i\}$ 是 \mathbb{C} 作为 \mathbb{R} 上的一个向量空间的一个基, 因此 $[\mathbb{C}:\mathbb{R}] = 2$ 。 \mathbb{R} 是 \mathbb{Q} 的一个无限扩展, 因为 \mathbb{R} 作为 \mathbb{Q} 上的一个向量空间是无限维的。

定义 4.3.7 (代数数与超越数 Algebraic and Transcendental Numbers). 设 F 是一个域, $F[x]$ 是 F 上的多项式环, K 是 F 的一个域扩张。如果存在一个非零多项式 $f(x) \in F[x]$, 使得 $f(a) = 0$, $a \in K$, 则称 a 是 F 上的一个代数数, 否则称 a 是 F 上的一个超越数。

定义 4.3.8 (代数扩张和超越扩张 Algebraic and Transcendental Extensions). 设 F 是一个域, K/F 是 F 的一个域扩张。如果 K 中的每个元素都是 F 上的代数数, 则称 K/F 是一个代数扩张, 否则称 K/F 是一个超越扩张。

注解

代数数是指那些可以作为某个非零多项式的根的数, 而超越数则是那些不能作为任何非零多项式的根的数。例如, $\sqrt{2}$ 是 \mathbb{Q} 上的一个代数数, 因为它是多项式 $x^2 - 2$ 的一个根。另一方面, π 是 \mathbb{Q} 上的一个超越数, 因为不存在任何非零多项式 $f(x) \in \mathbb{Q}[x]$ 使得 $f(\pi) = 0$ 。代数扩张是指扩张域中的每个元素都是基域上的代数数, 而超越扩张则包含至少一个超越数。根据代数基本定理 3.4.1, \mathbb{C} 中的每个元素都是 \mathbb{R} 上的代数数, 也即任意一个实数域上的多项式方程在复数域中都有解, 因此 \mathbb{C} 是 \mathbb{R} 的一个代数扩张。 \mathbb{R} 是 \mathbb{Q} 的一个超越扩张, 存在 $\pi \in \mathbb{R}$ 是 \mathbb{Q} 上的一个超越数。

定义 4.3.9 (可约多项式与不可约多项式 Reducible and Irreducible Polynomials). 设 F 是一个域, $F[x]$ 是 F 上的多项式环。如果存在两个次数均小于 $f(x)$ 的非零多项式 $g(x), h(x) \in F[x]$, 使得 $f(x) = g(x)h(x)$, 则称 $f(x)$ 在 F 上是可约的, 否则称 $f(x)$ 在 F 上是不可约的。

定义 4.3.10 (代数闭包 Algebraic Closure). 设 F 是一个域, K/F 是 F 的一个域扩张。如果 K/F 是一个代数扩张, 并且使得 $f(x)$ 可以写成一系列在 $K[x]$ 中的一次多项式的乘积, 也即

$$f(x) = a(x - r_1)(x - r_2) \cdots (x - r_n), \quad a, r_1, r_2, \dots, r_n \in K,$$

则称 K 是 F 的一个代数闭包。

定理 4.3.2 (广义代数基本定理 Fundamental Theorem of Algebraic Closure). 每个域 F 都存在代数闭包, 并且任何两个代数闭包都是同构的, 记为 \overline{F} 。

注解

多项式 $g(x) = x^2 - 1$ 在 \mathbb{R} 上是可约的, 因为它可以分解为 $(x-1)(x+1)$ 。另一方面, 多项式 $f(x) = x^2 + 1$ 在 \mathbb{R} 上是不可约的, 而在 \mathbb{C} 上是可约的, 因为它可以分解为 $(x-i)(x+i)$ 。因此 \mathbb{C} 是 \mathbb{R} 的一个代数闭包。广义代数基本定理是代数基本定理 3.4.1 的推广版本, 它适用于任意域, 而不仅仅是复数域。

定义 4.3.11 (可分多项式与不可分多项式 Separable and Inseparable Polynomials). 设 F 是一个域, $F[x]$ 是 F 上的多项式环。如果正次数多项式 $f(x) \in F[x]$ 的每个根在其分裂域中都是单根, 则称 $f(x)$ 在 F 上是可分的; 反之, 存在至少一个重根, 则称 $f(x)$ 在 F 上是不可分的。

注解

多项式 $f(x) = x^2 - 2$ 在 \mathbb{Q} 上是可分的, 因为它在其分裂域 $\mathbb{Q}(\sqrt{2})$ 中有两个不同的根 $\sqrt{2}$ 和 $-\sqrt{2}$ 。另一方面, 多项式 $g(x) = x^2 - 2x + 1 = (x-1)^2$ 在 \mathbb{Q} 上是不可分的, 因为它在其分裂域 \mathbb{Q} 中只有一个根 1, 且该根是重根。

定义 4.3.12 (可分扩张 Separable Extension). 设 F 是一个域, K/F 是 F 的一个代数扩张。 K/F 称为可分扩张, 当且仅当, K 中的每个元素都是 $F[x]$ 中某个不可约但可分多项式的根。

注解

$\mathbb{Q}(\sqrt{2})/\mathbb{Q}$ 是一个可分扩张, 其中 $\pm\sqrt{2}$ 是 \mathbb{Q} 上不可约但可分多项式 $x^2 - 2$ 的两个单根。

定义 4.3.13 (正规扩张 Normal Extension). 设 F 是一个域, K/F 是 F 的一个代数扩张。 K/F 称为正规扩张, 当且仅当, 所有 $F[x]$ 中不可约多项式在 K 中能完全可以分解为一次多项式的乘积。也即, K 是包含所有 $F[x]$ 中不可约多项式所有根。

注解

\mathbb{C}/\mathbb{R} 是一个正规扩张, 因为 \mathbb{C} 是包含所有 $\mathbb{R}[x]$ 中不可约多项式所有根的代数扩张域。例如, $\mathbb{R}[x]$ 中不可约多项式 $x^2 + 1$ 在 \mathbb{C} 中可以分解为 $(x-i)(x+i)$ 。另一方面, $\mathbb{Q}(\sqrt[3]{2})/\mathbb{Q}$ 不是一个正规扩张, 因为 $\mathbb{Q}(\sqrt[3]{2})$ 不包含不可约多项式 $x^3 - 2$ 的所有根。 $x^3 - 2$ 在 \mathbb{C} 中有三个根, 分别是 $\sqrt[3]{2}$ 、 $\sqrt[3]{2}\omega$ 和 $\sqrt[3]{2}\omega^2$, 其中 $\omega = e^{2\pi i/3}$ 是一个非实的复数。

4.3.3 伽罗瓦理论

定义 4.3.14 (伽罗瓦扩张 Galois Extension). 设 F 是一个域, K/F 是 F 的一个代数扩张。如果 K/F 既是正规扩张又是可分扩张, 则称 K/F 是一个伽罗瓦扩张。

定义 4.3.15 (伽罗瓦群 Galois Group). 设 F 是一个域, K/F 是 F 的一个域扩张。定义 K 上的一个 F -自同构: $\sigma: K \rightarrow K$, 使得 $\sigma(a) = a, \forall a \in F$ 。所有 K 上的 F -自同构, 记为 $\text{Gal}(K/F)$ 。

$\text{Gal}(K/F)$ 上的二元运算为函数的复合, 那么 $(\text{Gal}(K/F), \circ)$ 满足群公理, 称为 K/F 的伽罗瓦群。

注解

伽罗瓦群是研究域扩张对称性的重要工具。它捕捉了域扩张中元素之间的对称关系, 并且与多项式方程的可解性密切相关。伽罗瓦群的结构可以揭示多项式方程根的排列方式, 从而帮助理解多项式方程是否可以通过根式来解。

定义 4.3.16 (伽罗瓦对应 Galois Correspondence). 设 F 是一个域, K/F 是 F 的一个伽罗瓦扩张。设 $H \leq \text{Gal}(K/F)$ 是 $\text{Gal}(K/F)$ 的一个子群, 定义

$$K^H = \{a \in K : \sigma(a) = a, \forall \sigma \in H\}.$$

则 K^H 是 K/F 的一个子扩张域。反之, 设 E 是 K/F 的一个子扩张域, 定义

$$\text{Gal}(K/E) = \{\sigma \in \text{Gal}(K/F) : \sigma(a) = a, \forall a \in E\}.$$

则 $\text{Gal}(K/E)$ 是 $\text{Gal}(K/F)$ 的一个子群。这两个映射 $H \mapsto K^H$ 和 $E \mapsto \text{Gal}(K/E)$ 互为逆映射, 并且它们之间存在包含关系的反转。也即, 如果 $H_1 \leq H_2 \leq \text{Gal}(K/F)$, 则 $K^{H_2} \leq K^{H_1}$; 如果 $E_1 \leq E_2$ 是 K/F 的两个子扩张域, 则 $\text{Gal}(K/E_2) \leq \text{Gal}(K/E_1)$ 。这就是伽罗瓦对应。

注解

定理 4.3.3 (伽罗瓦基本定理 Fundamental Theorem of Galois Theory). 设 F 是一个域, K/F 是 F 的一个伽罗瓦扩张。则 K/F 的子扩张域与 $\text{Gal}(K/F)$ 的子群之间存在一一对应关系, 这个对应关系是包含关系的反转。

注解

定义 4.3.17 (可解群 Solvable Group). 设 G 是一个群, 如果存在一系列子群

$$\{e\} = G_0 \triangleleft G_1 \triangleleft G_2 \triangleleft \cdots \triangleleft G_n = G,$$

使得每个商群 G_{i+1}/G_i 都是阿贝尔群, 则称 G 是一个可解群。

定理 4.3.4 (多项式方程根式可解定理 Polynomial Equation Solvability by Radicals Theorem). 设 F 是一个域, $f(x) \in F[x]$ 是一个正次数多项式, K 是 $f(x)$ 在 F 上的一个分裂域。则 $f(x)$ 的根可以表示为 F 中元素和根式的有限次运算的结果, 当且仅当, 伽罗瓦群 $\text{Gal}(K/F)$ 是一个可解群。

定理 4.3.5 (阿贝尔-伽罗瓦定理 Abel Galois Theorem). 一般五次及以上的多项式方程没有根式解。

Chapter 5

线性代数

5.1 线性空间

5.1.1 线性空间的定义

定义 5.1.1 (线性空间 Linear Space). 设 $(F, +, \cdot)$ 为域, $(V, +)$ 为阿贝尔群。如果存在一个标量乘法 $\cdot: F \times V \rightarrow V$, 满足以下条件:

1. 对任意 $r, s \in F$, $\mathbf{v} \in V$, 有 $(r + s) \cdot \mathbf{v} = r \cdot \mathbf{v} + s \cdot \mathbf{v}$;
2. 对任意 $r \in F$, $\mathbf{u}, \mathbf{v} \in V$, 有 $r \cdot (\mathbf{u} + \mathbf{v}) = r \cdot \mathbf{u} + r \cdot \mathbf{v}$;
3. 对任意 $r, s \in F$, $\mathbf{v} \in V$, 有 $(r \cdot s) \cdot \mathbf{v} = r \cdot (s \cdot \mathbf{v})$;
4. 对任意 $\mathbf{v} \in V$, 有 $1 \cdot \mathbf{v} = \mathbf{v}$, $1 \in F$ 为 F 的乘法单位元。

则称 $(V, +, \cdot)$ 为 F -线性空间, 或向量空间 *Vector Space*。 V 中的元素称为向量 *Vector*, F 中的元素称为标量 *Scalar*。

注解

线性空间是在交换群上定义了关于域的标量乘法, 在提到线性空间时, 一定要明确它的数域。 $\mathbf{0} \in V$ 是加法单位元, 也称为零向量 *Zero Vector*。

定义 5.1.2 (线性子空间 Linear Subspace). 设 $(V, +, \cdot)$ 为 F -线性空间, $W \subseteq V$ 。如果 $(W, +, \cdot)$ 也是 F -线性空间, 则称 W 为 V 的线性子空间

定理 5.1.1 (线性子空间判定定理). 设 $(V, +, \cdot)$ 为 F -线性空间, $W \subseteq V$ 。则 W 为 V 的线性子空间的充分必要条件为:

1. $\mathbf{0} \in W$;
2. 对任意 $\mathbf{u}, \mathbf{v} \in W$, 有 $\mathbf{u} - \mathbf{v} \in W$;
3. 对任意 $r, s \in F$, $\mathbf{u}, \mathbf{v} \in W$, 有 $r\mathbf{u} + s\mathbf{v} \in W$ 。

注解

在线性空间的判定定理中, 条件 1, 2 也是子群的判定定理, 因此线性子空间也是原空间的子群。线性子空间会继承原线性空间的结构, 比如, 二维平面 \mathbb{R}^2 是三维空间 \mathbb{R}^3 的线性子空间。

定义 5.1.3 (F^n 空间). 设 F 为一个域, F^n 中的元素为 n 元数组 $\mathbf{v} = (v_1, v_2, \dots, v_n)$ 。 F^n 上定义向量加法和标量乘法:

1. 向量加法: 对于任意 $\mathbf{u} = (u_1, \dots, u_n), \mathbf{v} = (v_1, \dots, v_n) \in F^n$, 有

$$\mathbf{u} + \mathbf{v} = (u_1 + v_1, u_2 + v_2, \dots, u_n + v_n).$$

2. 标量乘法: 对于任意 $r \in F, \mathbf{v} = (v_1, v_2, \dots, v_n) \in F^n$, 有

$$r \cdot \mathbf{v} = (r \cdot v_1, r \cdot v_2, \dots, r \cdot v_n).$$

则 F^n 是一个 F -线性空间。

注解

F^n 空间是最基础的线性空间, F^n 空间的维数为 n , 所有 n 维 F -线性空间都与 F^n 空间同构。如果 $F = \mathbb{R}$, 在 \mathbb{R}^n 的基础上在赋予内积结构, 得到欧几里得空间 **Euclidean Space**; 如果 $F = \mathbb{C}$, 在 \mathbb{C}^n 的基础上赋予内积结构, 得到酉空间 **Unitary Space**。

5.1.2 线性相关性

定义 5.1.4 (线性组合). 设 $(V, +, \cdot)$ 为 F -线性空间, $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_n \in V, r_1, r_2, \dots, r_n \in F$ 。称

$$\mathbf{u} = r_1 \cdot \mathbf{v}_1 + r_2 \cdot \mathbf{v}_2 + \dots + r_n \cdot \mathbf{v}_n$$

为 $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_n$ 的**线性组合**。

定义 5.1.5 (张成空间 Span). 设 $(V, +, \cdot)$ 为 F -线性空间。由 $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_n \in V$ **张成的空间**记为 $\text{span}(\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_n)$, 那么:

$$\text{span}(\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_n) = \left\{ \sum_{i=1}^n r_i \cdot \mathbf{v}_i : r_i \in F \right\}$$

命题 5.1.1. 设 $(V, +, \cdot)$ 为 F -线性空间。由 $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_n \in V$ 张成的空间 $\text{span}(\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_n)$ 是包含这组向量的最小线性子空间。

注解

线性组合源自线性空间对数乘和加法的封闭性, 线性组合的结果仍然在该线性空间中。张成空间是由一组向量通过线性组合所能生成的所有向量构成的集合, 它是包含这组向量的最小线性子空间。

定义 5.1.6 (线性相关性 Linear Dependence). 设 $(V, +, \cdot)$ 为 F -线性空间, $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_n \in V$ 。如果存在不全为零的 $r_1, r_2, \dots, r_n \in F$, 使得

$$r_1 \cdot \mathbf{v}_1 + r_2 \cdot \mathbf{v}_2 + \dots + r_n \cdot \mathbf{v}_n = \mathbf{0},$$

则称 $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_n$ 是**线性相关的**。反之, 如果仅当 $r_1 = r_2 = \dots = r_n = 0$ 时, 上式成立, 则称 $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_n$ 是**线性无关的**。

注解

一组向量 $\{\mathbf{v}_i : i = 1, 2, \dots, n\}$ 线性相关, 说明其中至少有一个向量可以表示成其他向量的线性组合。线性相关的几何意义: 在二维空间中, 两个向量线性相关当且仅当它们共线, 两个共线的向量可以表示为 $\mathbf{v}_2 = k \cdot \mathbf{v}_1$; 在三维空间中, 三个向量线性相关当且仅当它们共面, 三个共面的向量可以表示为 $\mathbf{v}_3 = k_1 \cdot \mathbf{v}_1 + k_2 \cdot \mathbf{v}_2$ 。反之, 在二维空间中不共线, 在三维空间中不共面的向量组是线性无关的。

5.1.3 基底与维数

定义 5.1.7 (基底与坐标 Basis And Coordinates). 设 $(V, +, \cdot)$ 为 F -线性空间。如果存在一组线性无关的向量 $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_n \in V$, 且 $V = \text{span}(\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_n)$, 则称 $\{\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_n\}$ 为 V 的一组**基底**。其中 $\forall \mathbf{v} \in V$ 都可以唯一用这一组坐标线性表出:

$$\mathbf{v} = \sum_{i=1}^n v_i \mathbf{v}_i$$

其中, n 元有序数组 (v_1, \dots, v_n) 是 \mathbf{v} 在基底 $\{\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_n\}$ 下的**坐标**。

命题 5.1.2. 任意线性空间 $(V, +, \cdot)$ 都至少存在一组基底。

证明. 设 $(V, +, \cdot)$ 为 F -线性空间。如果 $V = \{\mathbf{0}\}$, 则 $\{\mathbf{0}\}$ 是 V 的一组基底。如果 $V \neq \{\mathbf{0}\}$, 则存在 $\mathbf{v}_1 \in V, \mathbf{v}_1 \neq \mathbf{0}$ 。如果 $V = \text{span}(\mathbf{v}_1)$, 则 $\{\mathbf{v}_1\}$ 是 V 的一组基底。如果 $V \neq \text{span}(\mathbf{v}_1)$, 则存在 $\mathbf{v}_2 \in V, \mathbf{v}_2 \notin \text{span}(\mathbf{v}_1)$ 。如果 $V = \text{span}(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2)$, 则 $\{\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2\}$ 是 V 的一组基底。如果 $V \neq \text{span}(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2)$, 则存在 $\mathbf{v}_3 \in V, \mathbf{v}_3 \notin \text{span}(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2)$ 。依此类推, 可以得到一组线性无关的向量 $\{\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots\}$, 使得

$$V = \text{span}(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots).$$

该过程要么在有限步内终止, 要么生成一个无限序列。无论哪种情况, 最终都能得到一组基底。□

命题 5.1.3. 如果 V 有一组有限基底, 则所有基底的向量个数相同。

证明. 设 $(V, +, \cdot)$ 为 F -线性空间, $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_n \in V$ 是 V 的一组基底。如果存在另一组基底 $\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_m \in V$, 且 $m > n$, 则 $\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_m$ 线性相关, 即存在不全为零的 $r_1, r_2, \dots, r_m \in F$, 使得

$$r_1 \cdot \mathbf{u}_1 + r_2 \cdot \mathbf{u}_2 + \dots + r_m \cdot \mathbf{u}_m = \mathbf{0}.$$

因为 $V = \text{span}(\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_n)$, 所以每个 \mathbf{u}_i 都可以表示成 $\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_n$ 的线性组合, 即存在 $s_{ij} \in F, i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$, 使得

$$\mathbf{u}_i = \sum_{j=1}^n s_{ij} \cdot \mathbf{v}_j.$$

将上式代入前一个等式, 得到

$$\sum_{i=1}^m r_i \left(\sum_{j=1}^n s_{ij} \cdot \mathbf{v}_j \right) = \sum_{j=1}^n \left(\sum_{i=1}^m r_i s_{ij} \right) \cdot \mathbf{v}_j = \mathbf{0}.$$

因为 $\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_n$ 线性无关, 所以对于每个 $j = 1, 2, \dots, n$, 都有

$$\sum_{i=1}^m r_i s_{ij} = 0.$$

这构成了一个齐次线性方程组, 未知数为 r_1, r_2, \dots, r_m , 方程个数为 n , 未知数个数为 m , 且 $m > n$. 根据线性代数的基本理论, 该方程组有非零解, 这与 r_1, r_2, \dots, r_m 不全为零矛盾. 因此, $m \leq n$. 同理可证 $n \leq m$, 所以 $m = n$. \square

定义 5.1.8 (线性空间的维数 Dimension). 设 $(V, +, \cdot)$ 为 F -线性空间. 如果 V 有一组基底 $\{\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_n\}$, 则称 n 为 V 的**维数**, 记作 $\dim V = n$. 如果 V 没有有限基底, 则称 V 为**无穷维线性空间**, 记作 $\dim V = \infty$.

注解

根据基底的定义, V 中任意一个向量都可以唯一表示成基底向量的线性组合. 在 n 维有限维线性空间中, 任意 n 个线性无关的向量都可以作为该空间的一组基底.

5.1.4 赋范线性空间

定义 5.1.9 (赋范线性空间 Normed Linear Space). 设 V 是 F -线性空间, 其中 F 通常是 \mathbb{R} 或 \mathbb{C} . 映射 $\|\cdot\|: V \rightarrow \mathbb{R}$ 称为**范数**, 当且仅当, $\forall \mathbf{x}, \mathbf{y} \in V$ 且 $\forall \alpha \in \mathbb{F}$, 有:

1. 非负性: $\|\mathbf{x}\| \geq 0$, 且当且仅当 $\mathbf{x} = \mathbf{0}$ 时取等号;
2. 齐次性: $\|\alpha \mathbf{x}\| = |\alpha| \|\mathbf{x}\|$;
3. 三角不等式: $\|\mathbf{x} + \mathbf{y}\| \leq \|\mathbf{x}\| + \|\mathbf{y}\|$.

二元组 $(V, \|\cdot\|)$ 称为**赋范线性空间**, 函数 $\|\cdot\|$ 称为 V 上的**范数**.

定义 5.1.10 (p -范数 p -Norm). 设 $\mathbf{v} = (v_1, v_2, \dots, v_n) \in F^n$, 其中 F 是 \mathbb{R} 或 \mathbb{C} . 定义 \mathbf{v} 的 **p -范数**为

$$\|\mathbf{v}\|_p = \left(\sum_{i=1}^n |v_i|^p \right)^{\frac{1}{p}}$$

特别地, 当 $p = 2$ 时, 称为**欧几里得范数**, 记为 $\|\mathbf{v}\|_2$; 当 $p = 1$ 时, 称为**曼哈顿范数**, 记为 $\|\mathbf{v}\|_1$; 当 $p = \infty$ 时, 称为**切比雪夫范数**, 记为 $\|\mathbf{v}\|_\infty$, 其定义为

$$\|\mathbf{v}\|_\infty = \max(|v_1|, |v_2|, \dots, |v_n|)$$

命题 5.1.4 (赋范线性空间诱导的度量). 设 $(V, \|\cdot\|)$ 为赋范线性空间, 定义 $d: V \times V \rightarrow \mathbb{R}$:

$$\forall \mathbf{x}, \mathbf{y} \in V, d(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \|\mathbf{x} - \mathbf{y}\|$$

则 (V, d) 为度量空间。

注解

赋范线性空间是对向量空间中长度概念的抽象。范数函数 $\|\cdot\|$ 用来衡量向量的大小或长度。赋范线性空间可以诱导出度量结构，因此赋范线性空间也是度量空间。

5.1.5 内积空间

定义 5.1.11 (内积空间 Inner Product Space). 设 V 是 F -线性空间，其中 F 通常是 \mathbb{R} 或 \mathbb{C} 。映射 $\langle \cdot, \cdot \rangle : V \times V \rightarrow F$ 称为内积，当且仅当， $\forall \mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z} \in V$ 且 $\forall \alpha, \beta \in F$ ，有：

1. 共轭对称性： $\langle \mathbf{x}, \mathbf{y} \rangle = \overline{\langle \mathbf{y}, \mathbf{x} \rangle}$ ；

2. 线性性：

$$\langle \alpha \mathbf{x} + \beta \mathbf{y}, \mathbf{z} \rangle = \alpha \langle \mathbf{x}, \mathbf{z} \rangle + \beta \langle \mathbf{y}, \mathbf{z} \rangle$$

$$\langle \mathbf{x}, \alpha \mathbf{y} + \beta \mathbf{z} \rangle = \overline{\alpha} \langle \mathbf{x}, \mathbf{y} \rangle + \overline{\beta} \langle \mathbf{x}, \mathbf{z} \rangle$$

3. 正定性： $\langle \mathbf{x}, \mathbf{x} \rangle \in \mathbb{R} \geq 0$ ，且当且仅当 $\mathbf{x} = 0$ 时取等号。

二元组 $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ 称为内积空间，函数 $\langle \cdot, \cdot \rangle$ 称为 V 上的内积。

定义 5.1.12 (欧几里得空间 Euclidean Space). 在 \mathbb{R}^n 中，任意 $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$ ， $\mathbf{y} = (y_1, \dots, y_n) \in \mathbb{R}^n$ ，定义内积为

$$\langle \mathbf{x}, \mathbf{y} \rangle = \sum_{i=1}^n x_i y_i$$

则 $(\mathbb{R}^n, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ 称为欧几里得空间。

定义 5.1.13 (酉空间 Unitary Space). 在 \mathbb{C}^n 中，任意 $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$ ， $\mathbf{y} = (y_1, \dots, y_n) \in \mathbb{C}^n$ ，定义内积为

$$\langle \mathbf{x}, \mathbf{y} \rangle = \sum_{i=1}^n x_i \bar{y}_i$$

其中， \bar{y}_i 是 y_i 的共轭复数。则 $(\mathbb{C}^n, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ 称为酉空间。

命题 5.1.5 (内积空间诱导的赋范线性空间). 设 $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ 为 F -内积空间，其中 F 是 \mathbb{R} 或 \mathbb{C} 。定义二范数 $\|\cdot\|_2 : V \rightarrow \mathbb{R}$ ：

$$\forall \mathbf{x} \in V, \|\mathbf{x}\|_2 = \sqrt{\langle \mathbf{x}, \mathbf{x} \rangle}$$

则 $(V, \|\cdot\|_2)$ 为赋范线性空间。

注解

内积空间是对向量空间中角度和长度概念的抽象。内积函数 $\langle \cdot, \cdot \rangle$ 用来衡量两个向量之间的夹角和长度。内积空间可以诱导出赋范结构，因此内积空间也是赋范线性空间。

5.1.6 正交性与投影

定义 5.1.14 (正交 Orthogonality). 设 $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ 为 F -内积空间, $\mathbf{x}, \mathbf{y} \in V$. 如果 $\langle \mathbf{x}, \mathbf{y} \rangle = 0$, 则称 \mathbf{x} 与 \mathbf{y} 正交, 记作 $\mathbf{x} \perp \mathbf{y}$.

命题 5.1.6. 内积空间中, 两正交非零向量线性无关。

定义 5.1.15 (单位正交基 Orthonormal Basis). 设 $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ 为 F -内积空间. 如果 V 有一组基底 $\{\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \dots, \mathbf{e}_n\}$, 且对任意 $i, j = 1, 2, \dots, n$, 有

$$\langle \mathbf{e}_i, \mathbf{e}_j \rangle = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases}$$

则称 $\{\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \dots, \mathbf{e}_n\}$ 为 V 的一组单位正交基。

命题 5.1.7 (Gram-Schmidt 正交化). 设 $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ 为 F -内积空间. V 中任何一组基 $\{\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_n\}$ 通过 Gram-Schmidt 正交化都可以构造出一组单位正交基. 其是一个递推过程:

1. 设 $\mathbf{u}_1 = \mathbf{v}_1$, 并归一化得到 $\mathbf{e}_1 = \frac{\mathbf{u}_1}{\|\mathbf{u}_1\|_2}$;
2. 对于 $k = 2, 3, \dots, n$, 递推公式:

$$\mathbf{u}_k = \mathbf{v}_k - \sum_{j=1}^{k-1} r_{kj} \mathbf{e}_j$$

其中, $r_{kj} = \langle \mathbf{v}_k, \mathbf{e}_j \rangle$; 然后, 归一化得到 $\mathbf{e}_k = \frac{\mathbf{u}_k}{\|\mathbf{u}_k\|_2}$;

注解

在三维空间中, 两个向量正交的几何意义是它们垂直, 即夹角为 90° . 单位正交基是指基底向量不仅两两正交, 而且每个向量的长度为 1. 单位正交基是内积空间中一组特殊的基底, 使用单位正交基可以简化许多计算。

定义 5.1.16 (投影 Projection). 设 $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ 为 F -内积空间, $\mathbf{x}, \mathbf{y} \in V$, 且 $\mathbf{y} \neq 0$. 则称

$$\text{proj}_{\mathbf{y}} \mathbf{x} = \frac{\langle \mathbf{x}, \mathbf{y} \rangle}{\langle \mathbf{y}, \mathbf{y} \rangle} \mathbf{y}$$

为 \mathbf{x} 在 \mathbf{y} 上的投影。

定义 5.1.17 (正交分解 Orthogonal Decomposition). 设 $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ 为 F -内积空间, $\mathbf{x}, \mathbf{y} \in V$, 且 $\mathbf{y} \neq 0$. 则称

$$\mathbf{x} = \text{proj}_{\mathbf{y}} \mathbf{x} + (\mathbf{x} - \text{proj}_{\mathbf{y}} \mathbf{x})$$

为 \mathbf{x} 关于 \mathbf{y} 的正交分解。

注解

根据向量线性相关性的定义 5.1.6, $\text{proj}_{\mathbf{y}} \mathbf{x}$ 与 \mathbf{y} 线性相关, 几何意义是在三维空间中, $\text{proj}_{\mathbf{y}} \mathbf{x} \parallel \mathbf{y}$. $\mathbf{x} - \text{proj}_{\mathbf{y}} \mathbf{x}$ 与 \mathbf{y} 线性无关且正交, 几何意义是在三维空间中, $\mathbf{x} - \text{proj}_{\mathbf{y}} \mathbf{x} \perp \mathbf{y}$.

5.1.7 柯西-施瓦茨不等式

定理 5.1.2 (柯西-施瓦茨不等式 Cauchy-Schwarz Inequality). 设 V 为 F -内积空间, $\mathbf{x}, \mathbf{y} \in V$, 则有:

$$|\langle \mathbf{x}, \mathbf{y} \rangle| \leq \|\mathbf{x}\|_2 \cdot \|\mathbf{y}\|_2$$

当且仅当, \mathbf{x} 与 \mathbf{y} 线性相关时取等号。

注解

柯西-施瓦茨不等式是内积空间中的基本不等式, 表明了内积与范数之间的关系。并且, 在两向量线性相关时, 内积的绝对值等于它们范数的乘积。

5.2 线性映射

5.2.1 线性映射与同构

定义 5.2.1 (线性映射 Linear Map). 设 V, W 是两个 F -线性空间。函数 $T: V \rightarrow W$ 称为**线性映射**，当且仅当，对于任意 $\mathbf{u}, \mathbf{v} \in V$, $r \in F$ ，满足：

1. $T(\mathbf{u} + \mathbf{v}) = T(\mathbf{u}) + T(\mathbf{v})$;
2. $T(r \cdot \mathbf{u}) = r \cdot T(\mathbf{u})$ 。

线性映射也称为**线性算子 Linear Operator**, $T(u)$ 简记为 Tu ; 如果是 $T: V \rightarrow V$ ，也称为**线性变换 Linear Transformation**; 如果 T 是双射，则称 T 为**线性同构 Linear Isomorphism**; 域 F 本身也可以看成一个 F -线性空间，那么 $T: V \rightarrow F$ 的线性映射称为**线性泛函 Linear Functional**。全体从 V 到 W 的线性映射构成的集合记为 $\mathcal{L}(V; W)$ 。

注解

线性映射是保持向量加法和数乘运算的映射，线性相关的向量经过线性映射后仍然线性相关，线性无关的向量经过线性映射后仍然线性无关。其几何意义是：二维空间中，共线的向量经过线性映射后仍然共线，三维空间中，共面的向量经过线性映射后仍然共面。线性空间的同构意味着两个线性空间在结构上是相同的，两个同构的线性空间可以看成是同一个线性空间。

定义 5.2.2 (线性映射的零空间 Zero Space). 设 V, W 是两个 F -线性空间， $T: V \rightarrow W$ 是一个线性映射。则称

$$\text{null}(T) := \{\mathbf{v} \in V : T(\mathbf{v}) = \mathbf{0}\}$$

为线性映射 T 的**零空间**，也称为线性映射 T 的**核 Kernel**。

命题 5.2.1 (线性映射的零空间是线性子空间). 设 V, W 是两个 F -线性空间， $T: V \rightarrow W$ 是一个线性映射，则 $\text{null}(T)$ 是 V 的线性子空间。

引理 5.2.1 (线性单射的充要条件). 设 V, W 是两个 F -线性空间， $T: V \rightarrow W$ 是一个线性单射，当且仅当， $\text{null}(T) = \{\mathbf{0}\}$

证明. 充分性：设 T 是单射，如果 $\mathbf{v} \in \text{null}(T)$ ，则 $T(\mathbf{v}) = \mathbf{0} = T(\mathbf{0})$ ，因为 T 是单射，所以 $\mathbf{v} = \mathbf{0}$ ，即 $\text{null}(T) = \{\mathbf{0}\}$ 。

必要性：设 $\text{null}(T) = \{\mathbf{0}\}$ ，如果 $T(\mathbf{u}) = T(\mathbf{v})$ ，则 $T(\mathbf{u}) - T(\mathbf{v}) = \mathbf{0}$ ，即 $T(\mathbf{u} - \mathbf{v}) = \mathbf{0}$ 。因为 $\text{null}(T) = \{\mathbf{0}\}$ ，所以 $\mathbf{u} - \mathbf{v} = \mathbf{0}$ ，即 $\mathbf{u} = \mathbf{v}$ ，所以 T 是单射。□

注解

线性映射的零空间的零空间可以看成是所有满足齐次方程 $T(\mathbf{v}) = \mathbf{0}$ 的解构成的集合。线性映射也是群同态，线性映射的零空间也是群同态的核，零空间自然也是原空间的线性子空间。

定理 5.2.1 (有限维线性空间同构的充要条件). 设 V, W 是两个有限维 F -线性空间, 则 V 与 W 同构的充分必要条件为 $\dim V = \dim W$.

证明. 充分性: 设 $\dim V = \dim W = n$, 则 V 有一组基底 $\{\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_n\}$, W 有一组基底 $\{\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_n\}$. 定义映射 $T: V \rightarrow W$, 使得 $T(\mathbf{v}_i) = \mathbf{w}_i$, 并对任意 $\mathbf{v} \in V$, 如果 $\mathbf{v} = \sum_{i=1}^n r_i \mathbf{v}_i$, 则定义

$$T(\mathbf{v}) = \sum_{i=1}^n r_i \mathbf{w}_i.$$

显然, T 是线性映射. 又因为 $\{\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_n\}$ 是 W 的基底, 所以 T 是满射. 如果 $T(\mathbf{v}) = \mathbf{0}$, 则 $\sum_{i=1}^n r_i \mathbf{w}_i = \mathbf{0}$, 因为 $\{\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_n\}$ 线性无关, 所以 $r_i = 0$, 即 $\mathbf{v} = \mathbf{0}$, 根据引理 5.2.1 T 是单射.

必要性: 设 V 与 W 同构, 则存在双射线性映射 $T: V \rightarrow W$. 设 $\{\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_n\}$ 是 V 的一组基底, 则 $\{T(\mathbf{v}_1), T(\mathbf{v}_2), \dots, T(\mathbf{v}_n)\}$ 是 W 的一组基底. 因为 T 是单射, 所以 $\{T(\mathbf{v}_1), T(\mathbf{v}_2), \dots, T(\mathbf{v}_n)\}$ 线性无关; 因为 T 是满射, 所以 $\{T(\mathbf{v}_1), T(\mathbf{v}_2), \dots, T(\mathbf{v}_n)\}$ 张成 W . 因此, $\dim W = n = \dim V$. \square

注解

同构定理说明, 两个有限维线性空间同构的充分必要条件是它们的维数相等. 那么三维几何空间与 \mathbb{R}^3 是同构的, 三维空间中的任意一个“有向箭头”都可以唯一地对应到 \mathbb{R}^3 中的一个有序三元实数组, 这是解析几何的基础.

5.2.2 线性映射空间

定义 5.2.3 (零映射 Zero Map). 设 V, W 是两个 F -线性空间. 函数 $T: V \rightarrow W$ 称为**零映射**, 当且仅当, $\forall \mathbf{v} \in V$, 有 $T(\mathbf{v}) = \mathbf{0}$.

定义 5.2.4 (恒等映射 Identity Map). 设 V, W 是两个 F -线性空间. 函数 $I: V \rightarrow W$ 称为**恒等映射**, 当且仅当, $\forall \mathbf{v} \in V$, 有 $I(\mathbf{v}) = \mathbf{v}$.

命题 5.2.2. 零映射和恒等映射都是线性映射.

定义 5.2.5 (线性映射的加法). 设 V, W 是两个 F -线性空间, $T_1, T_2: V \rightarrow W$ 是两个线性映射. 则称 $T_1 + T_2: V \rightarrow W$ 为**线性映射的加法**, 其定义为:

$$(T_1 + T_2)(\mathbf{v}) = T_1(\mathbf{v}) + T_2(\mathbf{v}), \quad \forall \mathbf{v} \in V.$$

命题 5.2.3. 线性映射的加法是良定义的, 也即, $\forall T_1, T_2 \in \mathcal{L}(V; W)$, $T_1 + T_2 \in \mathcal{L}(V; W)$.

证明. $\forall T_1, T_2 \in \mathcal{L}(V; W)$, $\forall \mathbf{u}, \mathbf{v} \in V, \forall r, s \in F$, 有

$$\begin{aligned} (T_1 + T_2)(r\mathbf{u} + s\mathbf{v}) &= T_1(r\mathbf{u} + s\mathbf{v}) + T_2(r\mathbf{u} + s\mathbf{v}) \\ &= rT_1(\mathbf{u}) + sT_1(\mathbf{v}) + rT_2(\mathbf{u}) + sT_2(\mathbf{v}) \\ &= (rT_1(\mathbf{u}) + rT_2(\mathbf{u})) + (sT_1(\mathbf{v}) + sT_2(\mathbf{v})) \\ &= r(T_1 + T_2)(\mathbf{u}) + s(T_1 + T_2)(\mathbf{v}). \end{aligned}$$

所以, $T_1 + T_2$ 依然是一个线性映射. \square

定义 5.2.6 (线性映射的数乘). 设 V, W 是两个 F -线性空间, $T: V \rightarrow W$ 是一个线性映射, $r \in F$. 则称 $rT: V \rightarrow W$ 为**线性映射的数乘**, 其定义为:

$$(rT)(\mathbf{v}) = r \cdot T(\mathbf{v}), \quad \forall \mathbf{v} \in V.$$

命题 5.2.4. 线性映射的数乘是良定义的, 也即, $\forall T \in \mathcal{L}(V; W), \forall r \in F, rT \in \mathcal{L}(V; W)$ 。

证明. $\forall T \in \mathcal{L}(V; W), \forall \mathbf{u}, \mathbf{v} \in V, \forall r, s, t \in F$, 有

$$\begin{aligned} (tT)(r\mathbf{u} + s\mathbf{v}) &= tT(r\mathbf{u} + s\mathbf{v}) \\ &= t(rT(\mathbf{u}) + sT(\mathbf{v})) \\ &= trT(\mathbf{u}) + tsT(\mathbf{v}) \\ &= r(tT)(\mathbf{u}) + s(tT)(\mathbf{v}). \end{aligned}$$

所以, tT 依然是一个线性映射。 □

命题 5.2.5 (线性映射的线性空间). 设 V, W 是两个 F -线性空间, $T, T_1, T_2: V \rightarrow W$ 是线性映射, $r, s \in F$, 则有

1. 加法交换律: $T_1 + T_2 = T_2 + T_1$;
2. 加法结合律: $(T_1 + T_2) + T = T_1 + (T_2 + T)$;
3. 存在加法单位元: $T + \mathbf{0} = T$, 其中 $\mathbf{0}$ 是零映射;
4. 存在加法逆元: $T + (-T) = \mathbf{0}$, 其中 $-T$ 是 T 的加法逆元;
5. 数乘结合律: $r(sT) = (rs)T$;
6. 数乘分配律: $(r + s)T = rT + sT$;
7. 数乘分配律: $r(T_1 + T_2) = rT_1 + rT_2$;
8. 数乘单位元: $1 \cdot T = T$, 其中 $1 \in F$ 是 F 的乘法单位元。

因此 $\mathcal{L}(V; W)$ 在映射加法和数乘下构成一个 F -线性空间。

命题 5.2.6 (有限维线性映射空间的维度). 设 V, W 是两个有限维 F -线性空间, 且 $\dim V = n$, $\dim W = m$, 则 $\dim \mathcal{L}(V; W) = mn$ 。

定义 5.2.7 (线性映射的乘法). 设 V, W, U 是三个 F -线性空间, $T_1: V \rightarrow W$ 和 $T_2: W \rightarrow U$ 是两个线性映射, 则称 $T_2T_1: V \rightarrow U$ 为**线性映射的乘法**, 其定义为:

$$(T_2T_1)(\mathbf{v}) := (T_2 \circ T_1)(\mathbf{v}) = T_2(T_1(\mathbf{v})), \quad \forall \mathbf{v} \in V.$$

命题 5.2.7 (线性映射乘法的性质). 设 V, W, U, X 是四个 F -线性空间

1. 结合律: $T_1: V \rightarrow W, T_2: W \rightarrow U, T_3: U \rightarrow X$ 是三个线性映射, 则有

$$T_3(T_2T_1) = (T_3T_2)T_1.$$

2. 左分配律: $T_1, T_2: V \rightarrow W$ 和 $S: W \rightarrow U$ 是三个线性映射, 则有

$$S(T_1 + T_2) = ST_1 + ST_2,$$

3. 右分配律: $T: V \rightarrow W$ 和 $S_1, S_2: W \rightarrow U$ 是两个线性映射, 则有

$$(S_1 + S_2)T = S_1T + S_2T,$$

4. 通常不满足交换律: $T: V \rightarrow W$ 和 $S: W \rightarrow U$ 是两个线性映射, 则一般情况下

$$ST \neq TS.$$

注解

线性映射空间说明, 从一个线性空间到另一个线性空间的所有线性映射本身也构成一个线性空间。对于有限维线性空间上的线性映射空间, 其维度等于原空间维度的乘积, 因此可以用矩阵来表示线性映射。对于 n 维 F -线性空间到自身的线性变换, 在线性映射的乘法下构成一个群, 称为一般线性群 **General Linear Group** 4.1.20, 记为 $\text{GL}_n(F)$ 。

5.3 矩阵

5.3.1 矩阵的定义

定义 5.3.1 (矩阵 Matrix). 设 $m, n \in \mathbb{N}^+$, F 为域, $a_{ij} \in F$, $i = 1, 2, \dots, m$, $j = 1, 2, \dots, n$. 称二维数表

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix}$$

为一个 $m \times n$ 的矩阵, 全体 $m \times n$ 矩阵的集合记作 $F^{m \times n}$ 。

定义 5.3.2 (方阵 Square Matrix). 行数等于列数的矩阵称为**方阵**, $n \times n$ 的方阵简称为 n 阶方阵。

定义 5.3.3 (单位矩阵 Identity Matrix). 对角线上的元素全为 1, 其他元素全为 0 的方阵, 记为 \mathbf{I} 。

定义 5.3.4 (零矩阵 Zero Matrix). 所有元素全为零的矩阵, 记为 $\mathbf{0}$ 。

定义 5.3.5 (矩阵的加法 Matrix Addition). 设 $\mathbf{A} = [a_{ij}] \in F^{m \times n}$, $\mathbf{B} = [b_{ij}] \in F^{m \times n}$, 两矩阵相加记为 $\mathbf{A} + \mathbf{B}$, 那么:

$$\mathbf{A} + \mathbf{B} = [a_{ij} + b_{ij}] \in F^{m \times n}$$

命题 5.3.1. 矩阵的加法是良定义的, 也即, $\forall \mathbf{A}, \mathbf{B} \in F^{m \times n}$, $\mathbf{A} + \mathbf{B} \in F^{m \times n}$ 。

定义 5.3.6 (矩阵的数乘 Scalar Multiplication of Matrix). 设 $\mathbf{A} = [a_{ij}] \in F^{m \times n}$, $r \in F$, 矩阵 \mathbf{A} 的数乘记为 $r\mathbf{A}$, 那么:

$$r\mathbf{A} = [r \cdot a_{ij}] \in F^{m \times n}$$

命题 5.3.2. 矩阵的数乘是良定义的, 也即, $\forall \mathbf{A} \in F^{m \times n}$, $\forall r \in F$, $r\mathbf{A} \in F^{m \times n}$ 。

命题 5.3.3 (矩阵线性空间). $\forall \mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C} \in F^{m \times n}$, 那么有:

1. 加法交换律: $\mathbf{A} + \mathbf{B} = \mathbf{B} + \mathbf{A}$;
2. 加法结合律: $(\mathbf{A} + \mathbf{B}) + \mathbf{C} = \mathbf{A} + (\mathbf{B} + \mathbf{C})$;
3. 存在加法单位元: $\mathbf{A} + \mathbf{0} = \mathbf{A}$;
4. 存在加法逆元: $\mathbf{A} + (-\mathbf{A}) = \mathbf{0}$;
5. 数乘分配律: $r(\mathbf{A} + \mathbf{B}) = r\mathbf{A} + r\mathbf{B}$;
6. 数乘分配律: $(r + s)\mathbf{A} = r\mathbf{A} + s\mathbf{A}$;
7. 数乘结合律: $(rs)\mathbf{A} = r(s\mathbf{A})$;
8. 数乘单位元: $1\mathbf{A} = \mathbf{A}$ 。

因此, $F^{m \times n}$ 在矩阵加法和数乘下构成一个 F -线性空间。矩阵线性空间的维度为 $\dim F^{m \times n} = mn$ 。

定义 5.3.7 (矩阵的乘法 Matrix Multiplication). 设 $\mathbf{A} = [a_{ij}] \in F^{m \times p}$, $\mathbf{B} = [b_{ij}] \in F^{p \times n}$, 两矩阵的乘积记为 \mathbf{AB} , 那么:

$$\mathbf{AB} = [c_{ij}] \in F^{m \times n}$$

其中,

$$c_{ij} = \sum_{k=1}^p a_{ik} b_{kj}, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n$$

命题 5.3.4 (方阵乘法的性质). 设 $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C} \in F^{n \times n}$, 那么有:

1. 结合律: $(\mathbf{AB})\mathbf{C} = \mathbf{A}(\mathbf{BC})$;
2. 左分配律: $\mathbf{A}(\mathbf{B} + \mathbf{C}) = \mathbf{AB} + \mathbf{AC}$;
3. 右分配律: $(\mathbf{A} + \mathbf{B})\mathbf{C} = \mathbf{AC} + \mathbf{BC}$;
4. 单位元: $\mathbf{IA} = \mathbf{AI} = \mathbf{A}$;
5. 数乘结合律: $r(\mathbf{AB}) = (r\mathbf{A})\mathbf{B} = \mathbf{A}(r\mathbf{B})$, 其中 $r \in F$;
6. 通常不满足交换律: $\mathbf{AB} \neq \mathbf{BA}$ 。

5.3.2 矩阵与线性映射

对于有限维线性空间上的线性映射空间 $\mathcal{L}(V; W)$, 如果 $\dim V = n$, $\dim W = m$, 那么 $\mathcal{L}(V; W)$ 与 $F^{m \times n}$ 同构。因此可以用矩阵来表示线性映射, 方阵表示线性变换。设 $\{\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_n\}$ 是一个 V 的一组基, $\{\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_m\}$ 是一个 W 的一组基, $T \in \mathcal{L}(V; W)$ 。 V 中任意一个向量可以表示为:

$$\mathbf{v} = \sum_{j=1}^n v_j \mathbf{v}_j$$

$\mathbf{w} = T\mathbf{v}$ 可以表示为:

$$\mathbf{w} = T\mathbf{v} = T\left(\sum_{j=1}^n v_j \mathbf{v}_j\right) = \sum_{j=1}^n v_j T(\mathbf{v}_j)$$

其中, $T(\mathbf{v}_j)$ 用 $\{\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_m\}$ 线性表出:

$$T(\mathbf{v}_j) = \sum_{i=1}^m s_{ij} \mathbf{w}_i$$

于是有:

$$\mathbf{w} = \sum_{i=1}^m \left(\sum_{j=1}^n s_{ij} v_j \right) \mathbf{w}_i$$

写成矩阵乘法的形式:

$$\begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{1n} \\ s_{21} & s_{22} & \cdots & s_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{m1} & s_{m2} & \cdots & s_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix}$$

其中, w_i 是 \mathbf{w} 在基底 $\{\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_m\}$ 下的坐标, v_j 是 \mathbf{v} 在基底 $\{\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_n\}$ 下的坐标。 s_{ij} 是线性映射 T 在基底 $\{\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_n\}$ 和 $\{\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_m\}$ 下的矩阵表示。因此, 线性映射的加法、数乘和乘法可以用矩阵的加法、数乘和乘法来表示。矩阵乘法的定义中, 要求第一个矩阵的列数要等于第二个矩阵的行数。这与线性映射的乘法是一致的, 对应中介空间的维度。

5.3.3 矩阵的秩

定义 5.3.8 (向量组的秩 Rank of Set of Vectors). 设 V 是一个 F -线性空间, $\{\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_k\} \subseteq V$ 是 V 中的一组向量, 则该向量组的秩记为 $\text{rank}\{\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_k\}$, 定义为该向量组的极大线性无关组的元素个数。

命题 5.3.5. 设 V 是一个 F -线性空间, 有 $\text{rank}\{\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_k\} = \dim \text{span}\{\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_k\}$ 。

推论 5.3.1. 如果 $\{\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_k\} \subseteq V$ 是 V 中的一组基, 那么 $\text{rank}\{\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_k\} = \dim V$ 。

定义 5.3.9 (行向量组与列向量组). 设 $\mathbf{A} \in F^{m \times n}$, 则 \mathbf{A} 的行向量组是指 \mathbf{A} 的每一行所组成的向量组, 记作 $\text{Row}(\mathbf{A})$; \mathbf{A} 的列向量组是指 \mathbf{A} 的每一列所组成的向量组, 记作 $\text{Col}(\mathbf{A})$ 。

命题 5.3.6. 矩阵的行向量组的秩等于列向量组的秩。

证明. 设 $\mathbf{A} \in F^{m \times n}$, $\text{Row}(\mathbf{A}) = \{\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_m\}$, $\text{Col}(\mathbf{A}) = \{\mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2, \dots, \mathbf{c}_n\}$ 。设 $\text{rank}\{\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_m\} = r$, 则存在 r 个线性无关的行向量 $\mathbf{r}_{i_1}, \mathbf{r}_{i_2}, \dots, \mathbf{r}_{i_r}$, 使得

$$\text{span}\{\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_m\} = \text{span}\{\mathbf{r}_{i_1}, \mathbf{r}_{i_2}, \dots, \mathbf{r}_{i_r}\}.$$

设 \mathbf{B} 是由 \mathbf{A} 的行向量组中的 $\mathbf{r}_{i_1}, \mathbf{r}_{i_2}, \dots, \mathbf{r}_{i_r}$ 组成的 $r \times n$ 矩阵, 则 $\text{Row}(\mathbf{B}) = \{\mathbf{r}_{i_1}, \mathbf{r}_{i_2}, \dots, \mathbf{r}_{i_r}\}$ 。因为 $\text{span}\{\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_m\} = \text{span}\{\mathbf{r}_{i_1}, \mathbf{r}_{i_2}, \dots, \mathbf{r}_{i_r}\}$, 所以 $\text{Col}(\mathbf{A})$ 中的每个向量都可以表示成 $\text{Col}(\mathbf{B})$ 中向量的线性组合。因此, $\text{rank}\{\mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2, \dots, \mathbf{c}_n\} \leq r$ 。同理, 设 $\text{rank}\{\mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2, \dots, \mathbf{c}_n\} = s$, 则存在 s 个线性无关的列向量 $\mathbf{c}_{j_1}, \mathbf{c}_{j_2}, \dots, \mathbf{c}_{j_s}$, 使得

$$\text{span}\{\mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2, \dots, \mathbf{c}_n\} = \text{span}\{\mathbf{c}_{j_1}, \mathbf{c}_{j_2}, \dots, \mathbf{c}_{j_s}\}.$$

设 \mathbf{C} 是由 \mathbf{A} 的列向量组中的 $\mathbf{c}_{j_1}, \mathbf{c}_{j_2}, \dots, \mathbf{c}_{j_s}$ 组成的 $m \times s$ 矩阵, 则 $\text{Col}(\mathbf{C}) = \{\mathbf{c}_{j_1}, \mathbf{c}_{j_2}, \dots, \mathbf{c}_{j_s}\}$ 。因为 $\text{span}\{\mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2, \dots, \mathbf{c}_n\} = \text{span}\{\mathbf{c}_{j_1}, \mathbf{c}_{j_2}, \dots, \mathbf{c}_{j_s}\}$, 所以 $\text{Row}(\mathbf{A})$ 中的每个向量都可以表示成 $\text{Row}(\mathbf{C})$ 中向量的线性组合。因此, $\text{rank}\{\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_m\} \leq s$ 。综上所述, $\text{rank}\{\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_m\} = r \leq s = \text{rank}\{\mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2, \dots, \mathbf{c}_n\}$, 且 $\text{rank}\{\mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2, \dots, \mathbf{c}_n\} = s \leq r = \text{rank}\{\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_m\}$ 。因此, $\text{rank}\{\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_m\} = \text{rank}\{\mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2, \dots, \mathbf{c}_n\}$ 。□

定义 5.3.10 (矩阵的秩 Rank of Matrix). 根据命题 5.3.6, 矩阵的行向量组的秩等于列向量组的秩, 因此可以定义矩阵的秩记为 $\text{rank}(\mathbf{A})$, 等于行向量组和列向量组的秩。

命题 5.3.7 (矩阵秩的性质). 设 $\mathbf{A}, \mathbf{B} \in F^{m \times n}$, $r \in F$, 那么有:

1. $\text{rank}(\mathbf{A}) \leq \min(m, n)$;
2. $\text{rank}(\mathbf{A} + \mathbf{B}) \leq \text{rank}(\mathbf{A}) + \text{rank}(\mathbf{B})$;
3. $\text{rank}(r\mathbf{A}) = \text{rank}(\mathbf{A})$, 其中 $r \neq 0$;
4. $\mathbf{B} \in F^{n \times p}$, 则 $\text{rank}(\mathbf{AB}) \leq \min(\text{rank}(\mathbf{A}), \text{rank}(\mathbf{B}))$ 。

定理 5.3.1 (秩-零化子定理 Rank-Nullity Theorem). 设 $\mathbf{A} \in F^{m \times n}$, 那么有:

$$\text{rank}(\mathbf{A}) + \dim[\text{null}(\mathbf{A})] = n$$

证明. 设 $\text{rank}(\mathbf{A}) = r$, 则 \mathbf{A} 的行向量组中存在 r 个线性无关的行向量 $\mathbf{r}_{i_1}, \mathbf{r}_{i_2}, \dots, \mathbf{r}_{i_r}$, 使得

$$\text{span}\{\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_m\} = \text{span}\{\mathbf{r}_{i_1}, \mathbf{r}_{i_2}, \dots, \mathbf{r}_{i_r}\}.$$

设 \mathbf{B} 是由 \mathbf{A} 的行向量组中的 $\mathbf{r}_{i_1}, \mathbf{r}_{i_2}, \dots, \mathbf{r}_{i_r}$ 组成的 $r \times n$ 矩阵, 则 $\text{Row}(\mathbf{B}) = \{\mathbf{r}_{i_1}, \mathbf{r}_{i_2}, \dots, \mathbf{r}_{i_r}\}$ 。因为 $\text{span}\{\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_m\} = \text{span}\{\mathbf{r}_{i_1}, \mathbf{r}_{i_2}, \dots, \mathbf{r}_{i_r}\}$, 所以 $\text{null}(\mathbf{A}) = \text{null}(\mathbf{B})$ 。又因为 $\text{Row}(\mathbf{B})$ 中的行向量线性无关, 所以 $\text{rank}(\mathbf{B}) = r$ 。因此, $\dim[\text{null}(\mathbf{B})] = n - r$, 即 $\dim[\text{null}(\mathbf{A})] = n - r$ 。故有 $\text{rank}(\mathbf{A}) + \dim[\text{null}(\mathbf{A})] = r + (n - r) = n$ 。□

5.3.4 矩阵的转置

定义 5.3.11 (矩阵的转置 Transpose of Matrix). 设 $\mathbf{A} = [a_{ij}] \in F^{m \times n}$, 则 \mathbf{A} 的转置记为 \mathbf{A}^T , 定义为:

$$\mathbf{A}^T = [a_{ji}] \in F^{n \times m}$$

命题 5.3.8 (矩阵转置的性质). 设 $\mathbf{A}, \mathbf{B} \in F^{m \times n}$, $r \in F$, 那么有:

1. $(\mathbf{A}^T)^T = \mathbf{A}$;
2. $(\mathbf{A} + \mathbf{B})^T = \mathbf{A}^T + \mathbf{B}^T$;
3. $(r\mathbf{A})^T = r\mathbf{A}^T$;
4. 如果 $\mathbf{B} \in F^{n \times p}$, 则 $(\mathbf{AB})^T = \mathbf{B}^T \mathbf{A}^T$ 。
5. $\text{rank}(\mathbf{A}^T) = \text{rank}(\mathbf{A})$ 。

注解

矩阵的转置就是将矩阵的行和列互换。

定义 5.3.12 (对称矩阵与反对称矩阵 Symmetric Matrix And Skew-Symmetric Matrix). 设方阵 $\mathbf{A} \in \mathbb{F}^{n \times n}$,

1. \mathbf{A} 称为**对称矩阵**, 当且仅当, $\mathbf{A} = \mathbf{A}^T$;
2. \mathbf{A} 称为**反对称矩阵**, 当且仅当, $\mathbf{A} = -\mathbf{A}^T$ 。

命题 5.3.9. 设方阵 $\mathbf{A} \in \mathbb{F}^{n \times n}$, 则 $\mathbf{A} + \mathbf{A}^T$ 是对称矩阵, $\mathbf{A} - \mathbf{A}^T$ 是反对称矩阵。

推论 5.3.2. 反对称矩阵的主对角线元素全为零。

推论 5.3.3 (对称分解 Symmetric Decomposition). 设方阵 $\mathbf{A} \in \mathbb{F}^{n \times n}$, 则 \mathbf{A} 可以唯一表示为一个对称矩阵和一个反对称矩阵之和, 即:

$$\mathbf{A} = \frac{\mathbf{A} + \mathbf{A}^T}{2} + \frac{\mathbf{A} - \mathbf{A}^T}{2}$$

其中, $\frac{\mathbf{A} + \mathbf{A}^T}{2}$ 是对称矩阵, $\frac{\mathbf{A} - \mathbf{A}^T}{2}$ 是反对称矩阵。

5.3.5 方阵的行列式

定义 5.3.13 (排列 Permutation). 设 $n \in \mathbb{N}^+$, S_n 是所有 n 元排列的集合, $|S_n| = n!$; $\sigma \in S_n$ 是一个排列; $\sigma(i)$ 表示排列 σ 的第 i 个元素。如果存在 $i, j \in \{1, 2, \dots, n\}$, $i < j$ 且 $\sigma(i) > \sigma(j)$, 则称 (i, j) 是排列 σ 的一个**逆序**。如果排列 σ 的逆序个数为偶数, 则称 σ 是**偶排列**, 否则称 σ 是**奇排列**。

例 5.3.1. 设 $n = 3$, 所有的排列为:

$$S_3 = \{(1, 2, 3), (1, 3, 2), (2, 1, 3), (2, 3, 1), (3, 1, 2), (3, 2, 1)\}$$

其中,

1. $(1, 2, 3)$ 是偶排列, 逆序个数为 0;
2. $(1, 3, 2)$ 是奇排列, 逆序个数为 1;
3. $(2, 1, 3)$ 是奇排列, 逆序个数为 1;
4. $(2, 3, 1)$ 是偶排列, 逆序个数为 2;
5. $(3, 1, 2)$ 是奇排列, 逆序个数为 2;
6. $(3, 2, 1)$ 是偶排列, 逆序个数为 3。

定义 5.3.14 (行列式 Determinant). 设 $\mathbf{A} = [a_{ij}] \in F^{n \times n}$, 设函数 $\det : F^{n \times n} \rightarrow F$, 称为**行列式**, 记为 $\det(\mathbf{A})$ 或 $|\mathbf{A}|$ 。那么 $\det(\mathbf{A})$ 定义为矩阵 \mathbf{A} 中不同行不同列的元素的乘积之和:

$$\det(\mathbf{A}) = \sum_{\sigma \in S_n} \left(\text{sgn}(\sigma) \prod_{i=1}^n a_{i, \sigma(i)} \right)$$

其中, S_n 是所有 n 元排列的集合; $\sigma(i)$ 是排列 σ 的第 i 个元素; $\text{sgn}(\sigma)$ 是排列 σ 的符号, 如果:

1. σ 是偶排列, 则 $\text{sgn}(\sigma) = 1$;
2. σ 是奇排列, 则 $\text{sgn}(\sigma) = -1$ 。

例 5.3.2. 设 $\mathbf{A} \in F^{2 \times 2}$, 那么:

$$\det(\mathbf{A}) = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}$$

注解

行列式要求从不同行和不同列中挑选元素进行相乘, 因此只有方阵才有意义。对于一个 n 阶方阵, 相乘的元素个数有 n 个; 这种挑选一共有 $n!$ 中方式, 因此行列式中相加的项数有 $n!$ 项。下面介绍行列式按一行(列)展开定理, 可以简化行列式的计算。

定义 5.3.15 (余子式 Minor). 设 $\mathbf{A} = [a_{ij}] \in F^{n \times n}$, $i, j \in \{1, 2, \dots, n\}$, $n > 1$, 则 \mathbf{A} 的第 i 行第 j 列的余子式记为 M_{ij} , 定义为从矩阵 \mathbf{A} 中去掉第 i 行和第 j 列后得到的 $(n-1)$ 阶矩阵的行列式。也即:

$$M_{ij} = \begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1,j-1} & a_{1,j+1} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{i-1,1} & \cdots & a_{i-1,j-1} & a_{i-1,j+1} & \cdots & a_{i-1,n} \\ a_{i+1,1} & \cdots & a_{i+1,j-1} & a_{i+1,j+1} & \cdots & a_{i+1,n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{n,j-1} & a_{n,j+1} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}$$

令

$$A_{ij} = (-1)^{i+j} M_{ij}$$

称为 \mathbf{A} 的第 i 行第 j 列的代数余子式。

定义 5.3.16 (伴随矩阵 Adjugate Matrix). 设 $\mathbf{A} = [a_{ij}] \in F^{n \times n}$, $n > 1$, 则 \mathbf{A} 的伴随矩阵记为 $\text{adj}(\mathbf{A})$, 定义为:

$$\text{adj}(\mathbf{A}) = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ A_{n1} & A_{n2} & & A_{nn} \end{bmatrix}$$

其中, A_{ij} 是 \mathbf{A} 的第 i 行第 j 列的代数余子式。

定理 5.3.2 (行列式展开定理). 设 $\mathbf{A} = [a_{ij}] \in F^{n \times n}$, $i, j \in \{1, 2, \dots, n\}$, 那么有:

1. 当 $n = 1$ 时, $\det(\mathbf{A}) = a_{11}$;
2. 当 $n > 1$ 时,

(a) 按第 i 行展开:

$$\det(\mathbf{A}) = \sum_{j=1}^n a_{ij} A_{ij}$$

(b) 按第 j 列展开:

$$\det(\mathbf{A}) = \sum_{i=1}^n a_{ij} A_{ij}$$

其中, A_{ij} 是 \mathbf{A} 的第 i 行第 j 列的代数余子式。行列式展开定理还可以写成矩阵乘法的形式:

$$\det(\mathbf{A})\mathbf{I} = \mathbf{A}\text{adj}(\mathbf{A}) = \text{adj}(\mathbf{A})\mathbf{A}$$

例 5.3.3. 利用行列式展开定理, 设 $\mathbf{A} \in F^{3 \times 3}$, 那么:

$$\begin{aligned} \det(\mathbf{A}) &= \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} \\ &= a_{11}(-1)^{1+1} \begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} + a_{12}(-1)^{1+2} \begin{vmatrix} a_{21} & a_{23} \\ a_{31} & a_{33} \end{vmatrix} + a_{13}(-1)^{1+3} \begin{vmatrix} a_{21} & a_{22} \\ a_{31} & a_{32} \end{vmatrix} \\ &= a_{11}a_{22}a_{33} + a_{21}a_{32}a_{13} + a_{31}a_{12}a_{23} - a_{31}a_{22}a_{13} - a_{21}a_{12}a_{33} - a_{11}a_{32}a_{23} \end{aligned}$$

命题 5.3.10 (行列式不为零的充要条件). 设 $\mathbf{A} \in F^{n \times n}$, 那么 $\det(\mathbf{A}) \neq 0$ 的充要条件是 $\text{rank}(\mathbf{A}) = n$ 。

注解

行列式不为零的矩阵称为**非奇异矩阵**, 行列式为零的矩阵称为**奇异矩阵**。矩阵是否奇异, 与其行(列)向量组的线性相关性有关。如果行(列)向量组线性无关, 那么矩阵是**满秩矩阵**, 行列式不为 0, 矩阵非奇异。

推论 5.3.4. 设 $\mathbf{A} \in F^{n \times n}$, 那么

1. 如果 \mathbf{A} 的某一行(列)全为零, 则 $\det(\mathbf{A}) = 0$;
2. 如果 \mathbf{A} 的两行(列)相等, 则 $\det(\mathbf{A}) = 0$;
3. 如果 \mathbf{A} 的某一行(列)是另一些行(列)的线性组合, 则 $\det(\mathbf{A}) = 0$;

命题 5.3.11 (行列式的性质). 设 $\mathbf{A}, \mathbf{B} \in F^{n \times n}$, $r \in F$, 那么有:

1. $\det(\mathbf{I}) = 1$;
2. $\det(\mathbf{A}^T) = \det(\mathbf{A})$;
3. $\det(\overline{\mathbf{A}}) = \overline{\det(\mathbf{A})}$;
4. $\det(\mathbf{AB}) = \det(\mathbf{A}) \det(\mathbf{B})$;
5. $\det(r\mathbf{A}) = r^n \det(\mathbf{A})$;
6. 如果 \mathbf{A} 的两行(列)互换位置, 则 $\det(\mathbf{A})$ 变号;
7. 如果 \mathbf{B} 是由 \mathbf{A} 通过初等行变换得到的, 那么:
 - (a) 若 \mathbf{B} 是通过将 \mathbf{A} 的某一行(列)乘以 $r \neq 0$ 得到的, 则 $\det(\mathbf{B}) = r \det(\mathbf{A})$;
 - (b) 若 \mathbf{B} 是通过将 \mathbf{A} 的某一行(列)加上另一行(列)的 r 倍得到的, 则 $\det(\mathbf{B}) = \det(\mathbf{A})$ 。

注解

矩阵的行列式的几何意义是该矩阵所表示的线性变换对空间体积的缩放比例。在后续章节介绍欧几里得空间向量的混合积 5.8.11 时详细介绍。

5.3.6 方阵的逆

定义 5.3.17 (矩阵的逆 Inverse of Matrix). 设 $\mathbf{A} \in F^{n \times n}$, 如果存在 $\mathbf{B} \in F^{n \times n}$, 使得:

$$\mathbf{AB} = \mathbf{BA} = \mathbf{I}$$

则称 \mathbf{A} 是**可逆矩阵**, \mathbf{B} 是 \mathbf{A} 的**逆矩阵**, 记为 \mathbf{A}^{-1} 。

注解

根据行列式按一行展开定理：

$$\det(\mathbf{A})\mathbf{I} = \mathbf{A}\text{adj}(\mathbf{A})$$

等式两边同时乘以 \mathbf{A}^{-1} ，得到：

$$\mathbf{A}^{-1}\det(\mathbf{A})\mathbf{I} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{A}\text{adj}(\mathbf{A}) = \mathbf{I}\text{adj}(\mathbf{A})$$

所以，

$$\mathbf{A}^{-1} = \frac{\text{adj}(\mathbf{A})}{\det(\mathbf{A})}$$

这说明了只有当 $\det(\mathbf{A}) \neq 0$ 时， \mathbf{A} 才可逆。

命题 5.3.12 (矩阵可逆的充要条件). 设 $\mathbf{A} \in F^{n \times n}$ ，那么 \mathbf{A} 可逆的充要条件是 $\det(\mathbf{A}) \neq 0$ 。

命题 5.3.13 (矩阵逆的性质). 设 $\mathbf{A}, \mathbf{B} \in F^{n \times n}$ ，那么有：

1. $(\mathbf{A}^{-1})^{-1} = \mathbf{A}$;
2. $(\mathbf{AB})^{-1} = \mathbf{B}^{-1}\mathbf{A}^{-1}$;
3. $(\mathbf{A}^T)^{-1} = (\mathbf{A}^{-1})^T$ 。

5.3.7 线性方程组的解

命题 5.3.14. 非齐次线性方程组存在唯一解的充要条件是系数矩阵可逆。齐次线性方程组存在非零解的充要条件是系数矩阵不可逆。

任意一个 n 元非齐次线性方程组：

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1n}x_n = b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2n}x_n = b_2 \\ \vdots \\ a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \cdots + a_{nn}x_n = b_n \end{cases}$$

可以写成矩阵乘法的形式：

$$\mathbf{Ax} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} = \mathbf{b}$$

其中， a_{ij} 和 b_i 是已知的， x_i 是未知数。矩阵 \mathbf{A} 可逆，那么线性方程组有唯一非零解：

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{b}$$

从代数角度看，设 $\text{Row}(\mathbf{A}) = \{\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_n\}$ ，那么方程组还可以写成

$$\mathbf{Ax} = \sum_{i=1}^n x_i \mathbf{a}_i$$

如果 \mathbf{A} 可逆, 矩阵满秩且行向量组线性无关, 那么 $\text{span}\{\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_n\} = F^n$, 自然存在唯一一组系数不全为零的 (x_1, x_2, \dots, x_n) 线性表出 $\sum_{i=1}^n x_i \mathbf{a}_i = \mathbf{b}$ 。反之, 如果 \mathbf{A} 不可逆, 那么可能不存在系数 (x_1, x_2, \dots, x_n) 线性表出 \mathbf{b} , 也可能存在无穷多组系数 (x_1, x_2, \dots, x_n) 线性表出 \mathbf{b} 。从几何角度看, 假设 $n = 3$, \mathbf{A} 不可逆, 那么 $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \mathbf{a}_3$ 共面, 如果 \mathbf{b} 不在该平面上, 则无法通过 $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \mathbf{a}_3$ 的线性组合得到 \mathbf{b} ; 如果 \mathbf{b} 在该平面上, 则有无穷多种组合方式。

类似地, 考察任意一个 n 元齐次线性方程组:

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1n}x_n = 0 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2n}x_n = 0 \\ \vdots \\ a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \cdots + a_{nn}x_n = 0 \end{cases}$$

可以写成矩阵乘法的形式:

$$\mathbf{A}\mathbf{x} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \mathbf{0}$$

如果 \mathbf{A} 可逆, 矩阵满秩且行向量组线性无关, 那么齐次线性方程组只有唯一的零解 $\mathbf{x} = \mathbf{0}$; 如果 \mathbf{A} 不可逆, 矩阵不满秩且行向量组线性相关, 使得 $\sum_{i=1}^n x_i \mathbf{a}_i = \mathbf{0}$ 的那么齐次线性方程组存在多组非零解。

注解

结合命题 5.3.10; 5.3.12 和 5.3.14, 有如下等价结论:

1. 矩阵可逆 \iff 矩阵满秩 \iff 矩阵非奇异 \iff 矩阵行列式不为零 \iff 矩阵的行(列)向量组线性无关 \iff 非齐次线性方程组有唯一非零解;
2. 矩阵不可逆 \iff 矩阵不满秩 \iff 矩阵奇异 \iff 矩阵行列式为零 \iff 矩阵的行(列)向量组线性相关 \iff 齐次线性方程组有存在非零解。

5.3.8 坐标变换矩阵

定义 5.3.18 (坐标变换矩阵). 设 V 是 n 维 F -线性空间, $\mathcal{E} = \{\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \dots, \mathbf{e}_n\}$ 和 $\mathcal{E}' = \{\mathbf{e}'_1, \mathbf{e}'_2, \dots, \mathbf{e}'_n\}$ 是 F^n 的两个基底。两组基底之间的关系为:

$$\begin{cases} \mathbf{e}'_1 &= a_{11}\mathbf{e}_1 + a_{21}\mathbf{e}_2 + \cdots + a_{n1}\mathbf{e}_n \\ \mathbf{e}'_2 &= a_{12}\mathbf{e}_1 + a_{22}\mathbf{e}_2 + \cdots + a_{n2}\mathbf{e}_n \\ &\vdots \\ \mathbf{e}'_n &= a_{1n}\mathbf{e}_1 + a_{2n}\mathbf{e}_2 + \cdots + a_{nn}\mathbf{e}_n \end{cases}$$

根据矩阵乘法的定义 5.3.7, 可以写成矩阵乘法的形式:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{e}'_1 \\ \mathbf{e}'_2 \\ \vdots \\ \mathbf{e}'_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{e}_1 \\ \mathbf{e}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{e}_n \end{bmatrix}$$

设 $\mathbf{v} \in V$ 分别用两组基底表示为:

$$\begin{aligned} \mathbf{v} &= \begin{bmatrix} v_1 & v_2 & \cdots & v_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{e}_1 \\ \mathbf{e}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{e}_n \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} v'_1 & v'_2 & \cdots & v'_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{e}'_1 \\ \mathbf{e}'_2 \\ \vdots \\ \mathbf{e}'_n \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} v'_1 & v'_2 & \vdots & v'_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{e}_1 \\ \mathbf{e}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{e}_n \end{bmatrix} \end{aligned}$$

所以线性空间中元素在不同基下的变换公式为:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} v_1 & v_2 & \cdots & v_n \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} v'_1 & v'_2 & \cdots & v'_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} v'_1 & v'_2 & \cdots & v'_n \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} v_1 & v_2 & \cdots & v_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}^{-1} \end{aligned}$$

其中, 称可逆矩阵 $[a_{ij}]$ 为基底变换矩阵。

5.3.9 相似矩阵

定义 5.3.19 (相似矩阵 Similar Matrices). 设 $\mathbf{A}, \mathbf{B} \in F^{n \times n}$ 是 n 维方阵, 如果存在可逆矩阵 $\mathbf{P} \in F^{n \times n}$, 使得

$$\mathbf{B} = \mathbf{P}^{-1} \mathbf{A} \mathbf{P}$$

则称 \mathbf{A} 和 \mathbf{B} 是相似矩阵, 记作 $\mathbf{A} \sim \mathbf{B}$ 。

命题 5.3.15 (矩阵的坐标变换). 设 V 是 n 维 F -线性空间, $\mathcal{E} = \{\mathbf{e}_1, \dots, \mathbf{e}_n\}$ 和 $\mathcal{E}' = \{\mathbf{e}'_1, \dots, \mathbf{e}'_n\}$ 是 V 的两个基底. 设 $T: V \rightarrow V$ 是 V 上的线性变换, $[\mathbf{T}]_{\mathcal{E}}$ 和 $[\mathbf{T}]_{\mathcal{E}'}$ 分别是 T 在基底 \mathcal{E} 和 \mathcal{E}' 下的矩阵表示. 设基底变换矩阵为 \mathbf{P} , 则有:

$$[\mathbf{T}]_{\mathcal{E}'} = \mathbf{P}^{-1}[\mathbf{T}]_{\mathcal{E}}\mathbf{P}$$

也即, $[\mathbf{T}]_{\mathcal{E}}$ 和 $[\mathbf{T}]_{\mathcal{E}'}$ 是相似矩阵。

命题 5.3.16. 相似矩阵有相同的秩。

证明. 设 $\mathbf{A}, \mathbf{B} \in F^{n \times n}$, $\mathbf{A} \sim \mathbf{B}$, 那么存在可逆矩阵 $\mathbf{P} \in F^{n \times n}$, 使得

$$\mathbf{B} = \mathbf{P}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{P}$$

可逆矩阵都是满秩矩阵, 因此 $\text{rank}(\mathbf{P}) = \text{rank}(\mathbf{P}^{-1}) = n$ 。根据矩阵乘法秩的性质 5.3.7, 有:

$$\text{rank}(\mathbf{B}) = \text{rank}(\mathbf{P}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{P}) = \min(\text{rank}(\mathbf{A}), n) = \text{rank}(\mathbf{A})$$

□

注解

相似矩阵可以看成是同一个线性变换在不同基底下的矩阵表示。因此, 相似矩阵有很多在坐标变换下不变的性质, 例如秩。在后面, 还会介绍更多相似矩阵更多不变的性质, 例如特征值、特征向量等。

5.4 特征值与特性向量

定义 5.4.1 (特征值与特征向量 Eigenvalue and Eigenvector). 设 V 是一个 F -线性空间, 线性变换 $T \in \mathcal{L}(V; V)$, 如果存在标量 $\lambda \in F$ 和非零向量 $\mathbf{v} \in V$, 使得

$$T(\mathbf{v}) = \lambda \mathbf{v}$$

则称 λ 为 T 的**特征值**, \mathbf{v} 为 T 对应于特征值 λ 的**特征向量**。

命题 5.4.1 (特征值与特征向量的性质). 设 V 是一个 F -线性空间, 线性变换 $T \in \mathcal{L}(V; V)$

1. 如果 λ 是 T 的一个特征值, 则 $k\lambda$ 也是 T 的一个特征值, 其中 $k \in F \setminus \{0\}$;
2. 如果 \mathbf{v} 是 T 对应于特征值 λ 的一个特征向量, 则 $k\mathbf{v}$ 也是对应于特征值 λ 的一个特征向量, 其中 $k \in F \setminus \{0\}$;
3. 如果 \mathbf{v} 是 T 对应于特征值 λ 的一个特征向量, 则对于任意正整数 m , \mathbf{v} 也是 T^m 对应于特征值 λ^m 的一个特征向量;

注解

线性变换的特征向量是一种在变换下仅改变大小而方向保持在同一直线的向量; 特征值表示缩放的程度。不管是有限维还是无限维线性空间, 特征值与特征向量的定义都是一样的。不过在无限维线性空间中, 线性变换将不能用矩阵表示, 特征值与特征向量的研究会更加困难, 下面的内容主要针对有限维线性空间。

如果 V 是 n 维 F -线性空间, $T \in \mathcal{L}(V; V)$ 可以表示为一个 $n \times n$ 矩阵 \mathbf{A} 。根据特征值和特征向量的定义 5.4.1, 有:

$$\mathbf{A}\mathbf{v} = \lambda \mathbf{v} \iff \mathbf{A}\mathbf{v} - \lambda \mathbf{v} = \mathbf{0} \iff (\mathbf{A} - \lambda \mathbf{I})\mathbf{v} = \mathbf{0}$$

其中, \mathbf{I} 是 $n \times n$ 单位矩阵, $\mathbf{v} \neq \mathbf{0}$ 。根据命题 5.3.14, 齐次线性方程组 $(\mathbf{A} - \lambda \mathbf{I})\mathbf{v} = \mathbf{0}$ 存在非零解, 当且仅当, $\mathbf{A} - \lambda \mathbf{I}$ 是奇异矩阵, 即 $\det(\mathbf{A} - \lambda \mathbf{I}) = 0$, 该式即**特征多项式方程**, 该方程的解 λ 即为矩阵 \mathbf{A} 的特征值。如果已知特征值 λ , 零空间 $\text{null}(\mathbf{A} - \lambda \mathbf{I})$ 则是相应特征向量 \mathbf{v} 所在的空间, 称为 \mathbf{A} 的**特征子空间**。

5.4.1 特征多项式与特征值

定义 5.4.2 (特征多项式 Characteristic Polynomial). 设 $\mathbf{A} \in F^{n \times n}$, 定义 \mathbf{A} 的**特征多项式**为

$$p(\lambda) = \det(\mathbf{A} - \lambda \mathbf{I}) \tag{5.1}$$

其中, \mathbf{I} 是 $n \times n$ 单位矩阵, λ 是变量。

注解

根据行列式的定义，行列式需要将不同行不同列的矩阵元素相乘，因此特征多项式是关于 λ 的 n 次多项式， $p(\lambda) \in F[\lambda]$ 。 $F[\lambda]$ 是域 F 上的多项式环 4.2.12。根据广义代数基本定理 4.3.2，设 K 是 F 的代数闭包，那么 $p(\lambda) = 0$ 在 K 中有 n 个根（重根算多重），也即特征多项式可以因式分解为：

$$p(\lambda) = \det(\mathbf{A} - \lambda \mathbf{I}) = (\lambda - \lambda_1)^{d_1} (\lambda - \lambda_2)^{d_2} \cdots (\lambda - \lambda_m)^{d_m} = 0 \quad (5.2)$$

其中，

1. $d_m \in \mathbb{Z}^+$, $1 \leq m \leq n$ 表示根的重数，并且 $\sum_{i=1}^m d_i = n$;
2. $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m \in K$ 表示互不相等的根，这些根即为矩阵 \mathbf{A} 的特征值。

特征多项式的展开：将特征多项式 5.1 写成分量的形式：

$$p(\lambda) = \det(\mathbf{A} - \lambda \mathbf{I}) = \begin{vmatrix} a_{11} - \lambda & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} - \lambda & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} - \lambda \end{vmatrix}$$

根据行列式展开定理 5.3.2，将特征多项式展开成标准形式：

$$p(\lambda) = (-1)^n \lambda^n + (-1)^{n-1} c_1 \lambda^{n-1} + \cdots + (-1)^k c_k \lambda^{n-k} + \cdots + c_n \quad (5.3)$$

其中，

1. $c_1 = \sum_{i=1}^n a_{ii}$ ，称为矩阵的迹 **trace**，记为 $\text{tr}(\mathbf{A})$;
2. $c_n = \det(\mathbf{A})$ ，是矩阵 \mathbf{A} 的行列式;
3. c_k , $1 < k < n$ 是矩阵 \mathbf{A} 的所有 k 阶主子式之和。

例 5.4.1 (二阶方阵的特征多项式展开). 设 $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}$ ，则特征多项式为：

$$p(\lambda) = \det(\mathbf{A} - \lambda \mathbf{I}) = \begin{vmatrix} a - \lambda & b \\ c & d - \lambda \end{vmatrix} \quad (5.4)$$

$$= (a - \lambda)(d - \lambda) - bc \quad (5.5)$$

$$= \lambda^2 - (a + d)\lambda + (ad - bc) \quad (5.6)$$

$$= \lambda^2 - \text{tr}(\mathbf{A})\lambda + \det(\mathbf{A}) \quad (5.7)$$

例 5.4.2 (三阶方阵的特征多项式展开). 设 $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{bmatrix}$, 则特征多项式为:

$$p(\lambda) = \det(\mathbf{A} - \lambda \mathbf{I}) = \begin{vmatrix} a - \lambda & b & c \\ d & e - \lambda & f \\ g & h & i - \lambda \end{vmatrix} \quad (5.8)$$

$$= (a - \lambda) \begin{vmatrix} e - \lambda & f \\ h & i - \lambda \end{vmatrix} - b \begin{vmatrix} d & f \\ g & i - \lambda \end{vmatrix} + c \begin{vmatrix} d & e - \lambda \\ g & h \end{vmatrix} \quad (5.9)$$

$$= (a - \lambda)((e - \lambda)(i - \lambda) - fh) - b(di - fg + \lambda g) + c(dh - eg + \lambda g) \quad (5.10)$$

$$= -\lambda^3 + \operatorname{tr}(\mathbf{A})\lambda^2 - (ae + ai + ei - bh - cf - dg)\lambda + \det(\mathbf{A}) \quad (5.11)$$

定理 5.4.1 (韦达定理 Vieta's Theorem). 设任意一个 n 次多项式 $p(x) \in F[x]$:

$$p(x) = x^n + a_1x^{n-1} + \cdots + a_{n-1}x + a_n, \quad a \neq 0$$

如果 K 是 F 的代数闭包, 并且 $p(x)$ 在 K 中有 m 个互不相等的根 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$, 并且每个根的重数分别为 d_1, d_2, \dots, d_m , 则有:

1. $\sum_{i=1}^m d_i = n$;
2. $\prod_{i=1}^m x_i^{d_i} = (-1)^n a_n$;
3. $\sum_{i=1}^m d_i x_i = -a_1$;

命题 5.4.2 (特征值之间的关系). 根据特征多项式的展开式 5.3 和韦达定理 5.4.1, 可以得到矩阵 \mathbf{A} 的特征值之间的关系:

1. 所有特征值之和 (重根算多重) 等于矩阵的迹: $\sum_{i=1}^m d_i \lambda_i = \operatorname{tr}(\mathbf{A})$
2. 所有特征值之积 (重根算多重) 等于矩阵的行列式: $\prod_{i=1}^m \lambda_i^{d_i} = \det(\mathbf{A})$

推论 5.4.1. 矩阵 \mathbf{A} 可逆, 当且仅当, 矩阵 \mathbf{A} 的所有特征值都不为零。

注解

根据命题 5.4.2, 矩阵的迹和行列式可以通过特征值计算出来。结合命题 5.3.10; 5.3.12 和 5.3.14, 扩充矩阵可逆的等价结论:

1. 矩阵可逆 \iff 矩阵满秩 \iff 矩阵非奇异 \iff 矩阵行列式不为零 \iff
 矩阵的行 (列) 向量组线性无关 \iff 非齐次线性方程组有唯一非零解 \iff
 所有特征值都不为零;
2. 矩阵不可逆 \iff 矩阵不满秩 \iff 矩阵奇异 \iff 矩阵行列式为零 \iff
 矩阵的行 (列) 向量组线性相关 \iff 齐次线性方程组有存在非零解 \iff
 存在特征值为零。

5.4.2 特征子空间与不变子空间

定义 5.4.3 (特征子空间 Eigenspace). 设 V 是一个 F -线性空间, 线性变换 $T \in \mathcal{L}(V; V)$, 如果 λ 是 T 的一个特征值, 则对应的**特征子空间**定义为

$$\begin{aligned} E_\lambda &:= \{\mathbf{v} \in V : T(\mathbf{v}) = \lambda\mathbf{v}\} \\ &= \{\mathbf{v} \in V : (T - \lambda I)\mathbf{v} = \mathbf{0}\} \\ &= \text{null}(T - \lambda I) \end{aligned}$$

其中 I 是恒等映射 5.2.4。

命题 5.4.3. 特征子空间 E_λ 是 V 的一个线性子空间。

推论 5.4.2. 零向量属于任意特征子空间, 即 $\mathbf{0} \in E_\lambda$ 。但零向量不是任何特征值对应的特征向量。

注解

如果 V 是有限维空间, T 用矩阵 $\mathbf{A} \in F^{n \times n}$ 表示, 那么系数矩阵 $\mathbf{A} - \lambda\mathbf{I}$ 是奇异矩阵, 特征子空间 E_λ 是 n 元齐次线性方程组 $(\mathbf{A} - \lambda\mathbf{I})\mathbf{v} = \mathbf{0}$ 的解空间。如果 V 是无限维空间, 比如函数空间, 那么特征子空间 E_λ 是线性微分方程 $T(\mathbf{v}) = \lambda\mathbf{v}$ 的解空间, 特征向量对应方程的基本解组, 用于构造方程的通解。

定义 5.4.4 (特征值的几何重数 Geometric Multiplicity of Eigenvalue). 设 $\mathbf{A} \in F^{n \times n}$, 如果 λ 是 \mathbf{A} 的一个特征值, 对应的特征子空间 E_λ 的维数 $\dim E_\lambda$ 称为 λ 的**几何重数**。根据秩-零化子定理 5.3.1, 几何重数的计算公式为:

$$\dim E_\lambda = \dim[\text{null}(\mathbf{A} - \lambda\mathbf{I})]$$

命题 5.4.4 (几何重数与代数重数的关系). 设 $\mathbf{A} \in F^{n \times n}$, 如果 λ 是 \mathbf{A} 的一个特征值, λ 的几何重数为 g , 代数重数为 d , 则有:

$$1 \leq g \leq d$$

命题 5.4.5 (不同特征值对应的特征向量线性无关). 如果 λ_1 和 λ_2 是 T 的两个不同的特征值, \mathbf{v}_1 和 \mathbf{v}_2 分别是对应的特征向量, 则 \mathbf{v}_1 和 \mathbf{v}_2 线性无关;

推论 5.4.3 (不同特征值的特征向量构成线性无关组). 如果 V 是有限维线性空间, T 有 n 个不同的特征值, 则对应的特征向量构成 V 的一个基

推论 5.4.4 (不同特征值的特征子空间的交集为零向量). 设 $\mathbf{A} \in F^{n \times n}$, 如果 λ_1 和 λ_2 是 \mathbf{A} 的两个不同的特征值, 则对应的特征子空间 E_{λ_1} 和 E_{λ_2} 的交集为零向量, 即

$$E_{\lambda_1} \cap E_{\lambda_2} = \{\mathbf{0}\}$$

定义 5.4.5 (不变子空间 Invariant Subspace). 设 V 是一个 F -线性空间, 线性变换 $T \in \mathcal{L}(V; V)$, 如果 W 是 V 的一个线性子空间, 并且 $\forall \mathbf{w} \in W$, 有 $T(\mathbf{w}) \in W$, 则称 W 是 T 的一个**不变子空间**。其中, V 和 $\{0\}$ 是不变子空间, 称为平凡不变子空间。其余的不变子空间称为非平凡不变子空间。

命题 5.4.6. 特征子空间 E_λ 是 T 的一个非平凡不变子空间。

注解

不变子空间是指在对线性变换 T 封闭的子空间。其作用是将高维空间的线性变换问题, 转化为低维子空间的线性变换问题, 从而简化问题的复杂度。特征子空间是重要的不变子空间, 其维数等于特征值的几何重数。比如, **主成分分析 PCA**, 就是通过寻找数据空间的主成分子空间, 从而实现数据降维。

5.4.3 矩阵的相似不变量

命题 5.4.7 (相似矩阵有相同的特征值). 设 $\mathbf{A}, \mathbf{B} \in F^{n \times n}$, 如果 \mathbf{A} 和 \mathbf{B} 是相似矩阵, 则它们有相同的特征值。

证明. 设 $\mathbf{B} = \mathbf{P}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{P}$, 其中 \mathbf{P} 是可逆矩阵。设 λ 是 \mathbf{A} 的一个特征值, 则有

$$\det(\mathbf{A} - \lambda\mathbf{I}) = 0$$

则有

$$\begin{aligned} \det(\mathbf{B} - \lambda\mathbf{I}) &= \det(\mathbf{P}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{P} - \lambda\mathbf{I}) \\ &= \det(\mathbf{P}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{P} - \lambda\mathbf{P}^{-1}\mathbf{P}) \\ &= \det[\mathbf{P}^{-1}(\mathbf{A} - \lambda\mathbf{I})\mathbf{P}] \\ &= \det(\mathbf{P}^{-1}) \det(\mathbf{A} - \lambda\mathbf{I}) \det(\mathbf{P}) \\ &= 0 \end{aligned}$$

因此, λ 也是 \mathbf{B} 的一个特征值。 □

推论 5.4.5. 结合命题 5.4.2 和命题 5.4.3, 相似矩阵有相同的特征多项式、迹和行列式。

注解

相似矩阵可以看成是同一个线性变换在不同基底下的矩阵表示。矩阵的秩、特征值、特征多项式、行列式、迹都是在线性变换的不同基底下不变的性质, 称为**相似不变量**。它们代表了线性变换的一些本质属性。

5.5 特殊矩阵

5.5.1 厄米矩阵与厄米算子

定义 5.5.1 (对称矩阵 Symmetric Matrix). 设 $\mathbf{A} \in F^{n \times n}$, 如果 $\mathbf{A}^T = \mathbf{A}$, 则称 \mathbf{A} 为**对称矩阵**。

定义 5.5.2 (共轭对称矩阵 Hermitian Matrix). 设 $\mathbf{A} \in \mathbb{C}^{n \times n}$, 如果,

$$\mathbf{A}^H = \overline{\mathbf{A}^T} = \mathbf{A}$$

则称 \mathbf{A} 为**共轭对称矩阵** 或**厄米矩阵** *Hermitian Matrix*。

命题 5.5.1 (共轭对称矩阵的性质). 设 $\mathbf{A} \in \mathbb{C}^{n \times n}$ 是共轭对称矩阵, 则有:

1. $(\mathbf{A} + \mathbf{B})^H = \mathbf{A}^H + \mathbf{B}^H = \mathbf{A} + \mathbf{B}$
2. $(c\mathbf{A})^H = \bar{c}\mathbf{A}^H = \bar{c}\mathbf{A}$, 其中 $c \in \mathbb{C}$
3. $(\mathbf{AB})^H = \mathbf{B}^H \mathbf{A}^H = \mathbf{BA}$

注解

实对称矩阵是实数域上的共轭对称矩阵。矩阵的共轭转置也常记为 \mathbf{A}^\dagger 或 \mathbf{A}^* 。

定义 5.5.3 (伴随算子 Adjoint Operator). 设 V 是一个内积空间, $T: V \rightarrow V$ 是一个线性变换。如果存在一个线性变换 $T^*: V \rightarrow V$, 使得 $\forall \mathbf{u}, \mathbf{v} \in V$, 都有

$$\langle T(\mathbf{u}), \mathbf{v} \rangle = \langle \mathbf{u}, T^*(\mathbf{v}) \rangle$$

则称 T^* 为 T 的**伴随算子**。

定义 5.5.4 (自伴随算子 Self-Adjoint Operator). 设 V 是一个内积空间, 线性变换 $T: V \rightarrow V$ 是**自伴随算子**, 当且仅当, $T = T^*$, 也即

$$\langle T(\mathbf{u}), \mathbf{v} \rangle = \langle \mathbf{u}, T(\mathbf{v}) \rangle = \overline{\langle T(\mathbf{v}), \mathbf{u} \rangle}$$

自伴随算子也称为**厄米算子** *Hermitian Operator*。

注解

在有限维的西空间中, 矩阵的共轭转置就是其伴随算子, 共轭对称矩阵是自伴随算子。需要注意, 在中文翻译中, 伴随算子中的 adjoint 与伴随矩阵中的 adjugate 是完全不同的概念。

命题 5.5.2. 复内积空间中自伴随算子不同特征值对应的特征向量是正交的; 自伴随算子的特征值都是实数。

证明. 设 V 是一个复内积空间, $T \in \mathcal{L}(V; V)$ 是一个自伴随算子, λ_1, λ_2 是 T 的两个特征值, $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2$ 是对应的特征向量。

1. 当 $\lambda_1 \neq \lambda_2$ 时, $\mathbf{v}_1 \neq \mathbf{v}_2 \neq \mathbf{0}$, 则有

$$\langle T(\mathbf{v}_1), \mathbf{v}_2 \rangle = \langle \lambda_1 \mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2 \rangle = \lambda_1 \langle \mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2 \rangle$$

$$\langle \mathbf{v}_1, T(\mathbf{v}_2) \rangle = \langle \mathbf{v}_1, \lambda_2 \mathbf{v}_2 \rangle = \overline{\lambda_2} \langle \mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2 \rangle$$

其中, $\langle T(\mathbf{v}_1), \mathbf{v}_2 \rangle = \langle \mathbf{v}_1, T(\mathbf{v}_2) \rangle$, 所以

$$(\lambda_1 - \overline{\lambda_2}) \langle \mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2 \rangle = 0$$

因为 $\lambda_1 - \overline{\lambda_2} \neq 0$, 所以 $\langle \mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2 \rangle = 0$, 也即 $\mathbf{v}_1 \perp \mathbf{v}_2$ 。

2. 当 $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$ 时, $\mathbf{v}_1 = \mathbf{v}_2 = \mathbf{v} \neq \mathbf{0}$, 则有

$$(\lambda - \overline{\lambda}) \langle \mathbf{v}, \mathbf{v} \rangle = 0$$

因为 $\langle \mathbf{v}, \mathbf{v} \rangle > 0$, 所以 $\lambda - \overline{\lambda} = 0$, 也即 $\lambda = \overline{\lambda}$, λ 是实数。

□

注解

命题 5.5.2 是量子力学的基础。量子力学中, 物理量对应于复内积空间 (可能是有限维, 也可能是无限维) 的自伴随算子, 对物理量测量前, 系统处于叠加态 (特征向量所张成的特征子空间中某个向量), 当对物理量进行测量时, 系统会坍缩到某个本征态 (特征向量), 测量值为特征向量对应的特征值, 是一个实数。

5.5.2 正交矩阵与酉矩阵

定义 5.5.5 (正交矩阵 Orthogonal Matrix). 设 $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$, 如果 $\mathbf{A}^T \mathbf{A} = \mathbf{A} \mathbf{A}^T = \mathbf{I}$, 则称 \mathbf{A} 为正交矩阵。

定义 5.5.6 (酉矩阵 Unitary Matrix). 设 $\mathbf{A} \in \mathbb{C}^{n \times n}$, 如果 $\mathbf{A}^H \mathbf{A} = \mathbf{A} \mathbf{A}^H = \mathbf{I}$, 则称 \mathbf{A} 为酉矩阵。

注解

正交矩阵是实数域上的酉矩阵。根据定义, 正交矩阵和酉矩阵都是可逆矩阵, 并且有 $\mathbf{A}^{-1} = \mathbf{A}^T$ 或 $\mathbf{A}^{-1} = \mathbf{A}^H$ 。

命题 5.5.3 (正交 (酉) 矩阵的乘积依然是正交 (酉) 矩阵). 设 $\mathbf{A}, \mathbf{B} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 是两个正交矩阵, 则 \mathbf{AB} 也是一个正交矩阵。

$$(\mathbf{AB})^T (\mathbf{AB}) = \mathbf{B}^T \mathbf{A}^T \mathbf{AB} = \mathbf{B}^T \mathbf{B} = \mathbf{I}$$

设 $\mathbf{A}, \mathbf{B} \in \mathbb{C}^{n \times n}$ 是两个酉矩阵, 则 \mathbf{AB} 也是一个酉矩阵。

$$(\mathbf{AB})^H (\mathbf{AB}) = \mathbf{B}^H \mathbf{A}^H \mathbf{AB} = \mathbf{B}^H \mathbf{B} = \mathbf{I}$$

命题 5.5.4 (正交 (酉) 矩阵的行列式的绝对值为 1). 设 $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 是一个正交矩阵, 则有

$$\det(\mathbf{A}^T \mathbf{A}) = \det(\mathbf{A}) \det(\mathbf{A}) = \det(\mathbf{A})^2 = \det(\mathbf{I}) = 1$$

所以 $\det(\mathbf{A}) = \pm 1$ 。

设 $\mathbf{A} \in \mathbb{C}^{n \times n}$ 是一个酉矩阵, 则有

$$\det(\mathbf{A}^H \mathbf{A}) = \overline{\det(\mathbf{A})} \det(\mathbf{A}) = |\det(\mathbf{A})|^2 = \det(\mathbf{I}) = 1$$

所以 $\det(\mathbf{A}) = e^{i\theta}$ 。

命题 5.5.5 (正交 (酉) 矩阵的行 (列) 向量组构成标准正交基). 设 $\mathbf{A} = [\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_n] \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 是一个正交矩阵, 则 $\{\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_n\}$ 是 \mathbb{R}^n 的一个标准正交基。设 $\mathbf{A} = [\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_n] \in \mathbb{C}^{n \times n}$ 是一个酉矩阵, 则 $\{\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_n\}$ 是 \mathbb{C}^n 的一个标准正交基。

命题 5.5.6 (正交 (酉) 矩阵是保内积的线性变换). 设 $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 是一个正交矩阵, 则有:

$$\langle \mathbf{Ax}, \mathbf{Ay} \rangle = (\mathbf{Ax})^T \mathbf{Ay} = \mathbf{x}^T \mathbf{A}^T \mathbf{Ay} = \mathbf{x}^T \mathbf{y} = \langle \mathbf{x}, \mathbf{y} \rangle$$

设 $\mathbf{A} \in \mathbb{C}^{n \times n}$ 是一个酉矩阵, 则有:

$$\langle \mathbf{Ax}, \mathbf{Ay} \rangle = (\mathbf{Ax})^H \mathbf{Ay} = \mathbf{x}^H \mathbf{A}^H \mathbf{Ay} = \mathbf{x}^H \mathbf{y} = \langle \mathbf{x}, \mathbf{y} \rangle$$

推论 5.5.1 (正交 (酉) 矩阵是保长度的线性变换). 设 \mathbf{A} 是一个正交 (酉) 矩阵, 则有:

$$\|\mathbf{Ax}\|_2 = \sqrt{\langle \mathbf{Ax}, \mathbf{Ax} \rangle} = \sqrt{\langle \mathbf{x}, \mathbf{x} \rangle} = \|\mathbf{x}\|_2$$

推论 5.5.2 (正交 (酉) 矩阵的特征值的绝对值为 1). 设 \mathbf{A} 是一个正交 (酉) 矩阵, λ 是 \mathbf{A} 的一个特征值, 则有

$$|\lambda| = 1$$

证明. 设 $\mathbf{v} \neq \mathbf{0}$ 是 \mathbf{A} 对应于特征值 λ 的特征向量, 则有

$$\mathbf{Av} = \lambda \mathbf{v}$$

因为 \mathbf{A} 是正交 (酉) 矩阵, 所以

$$\|\mathbf{Ax}\|_2 = \|\lambda \mathbf{x}\|_2 = |\lambda| \|\mathbf{x}\|_2 = \|\mathbf{x}\|_2$$

所以 $|\lambda| = 1$ 。 □

注解

正交矩阵和酉矩阵都是保内积的线性变换, 其几何意义是保持向量的长度和向量之间的夹角不变, 比如旋转变换就是一种正交变换。在无限维空间中, 保内积的线性变换称为酉算子。

命题 5.5.7 (正交 (酉) 矩阵不同特征值对应的特征向量是正交的). 设 \mathbf{A} 是一个正交 (酉) 矩阵, λ_1, λ_2 是 \mathbf{A} 的两个不同特征值, $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2$ 是对应的特征向量, 则有

$$\langle \mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2 \rangle = 0$$

证明. 设 \mathbf{A} 是一个正交 (酉) 矩阵, λ_1, λ_2 是 \mathbf{A} 的两个不同特征值, $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2$ 是对应的特征向量, 则有

$$\mathbf{A}\mathbf{v}_1 = \lambda_1\mathbf{v}_1, \quad \mathbf{A}\mathbf{v}_2 = \lambda_2\mathbf{v}_2$$

因为 \mathbf{A} 是正交 (酉) 矩阵, 所以

$$\langle \mathbf{A}\mathbf{v}_1, \mathbf{A}\mathbf{v}_2 \rangle = \langle \lambda_1\mathbf{v}_1, \lambda_2\mathbf{v}_2 \rangle = \lambda_1\overline{\lambda_2}\langle \mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2 \rangle = \langle \mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2 \rangle$$

所以

$$(\lambda_1\overline{\lambda_2} - 1)\langle \mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2 \rangle = 0$$

因为 $\lambda_1 \neq \lambda_2$ 并且 $\lambda_1\overline{\lambda_1} = \lambda_2\overline{\lambda_2} = 1$, 所以 $\lambda_1\overline{\lambda_2} \neq 1$, 所以 $\langle \mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2 \rangle = 0$. □

5.5.3 三角矩阵与可三角化矩阵

定义 5.5.7 (上三角矩阵 Upper Triangular Matrix). 设 $\mathbf{A} = [a_{ij}] \in F^{m \times n}$, 如果

$$a_{ij} = 0, \quad \forall i > j$$

则称 \mathbf{A} 为上三角矩阵。

定义 5.5.8 (下三角矩阵 Lower Triangular Matrix). 设 $\mathbf{A} = [a_{ij}] \in F^{m \times n}$, 如果

$$a_{ij} = 0, \quad \forall i < j$$

则称 \mathbf{A} 为下三角矩阵。

命题 5.5.8 (三角矩阵的主对角元素即为它的特征值). 设 $\mathbf{A} \in F^{n \times n}$ 是一个上三角矩阵, 那么

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ 0 & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

特征多项式为:

$$p(\lambda) = \det(\mathbf{A} - \lambda\mathbf{I}) = \begin{vmatrix} a_{11} - \lambda & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ 0 & a_{22} - \lambda & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & a_{nn} - \lambda \end{vmatrix} = (a_{11} - \lambda)(a_{22} - \lambda) \cdots (a_{nn} - \lambda)$$

则 \mathbf{A} 的特征值为主对角元素, 即

$$\lambda_1 = a_{11}, \lambda_2 = a_{22}, \dots, \lambda_n = a_{nn}$$

同理, 下三角矩阵的特征值也为其主对角元素。

注解

三角矩阵的有非常好的性质, 它的特征值可以直接从对角元素中读出。根据命题 5.5.10 和命题 5.4.2 可知, 三角矩阵的行列式等于其对角元素的乘积; 三角矩阵可逆, 当且仅当, 其对角元素全不为零。

定义 5.5.9 (可三角化矩阵 Triangularizable Matrix). 设 $\mathbf{A} \in F^{n \times n}$, 如果存在一个可逆矩阵 $\mathbf{P} \in F^{n \times n}$, 使得

$$\mathbf{P}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{P} = \mathbf{T}$$

其中, \mathbf{T} 是一个上(下)三角矩阵, 则称 \mathbf{A} 是可三角化矩阵。

命题 5.5.9 (可三角化矩阵的充要条件). 设 $\mathbf{A} \in F^{n \times n}$, 则 \mathbf{A} 可三角化的充分必要条件是 \mathbf{A} 在域 F 上有 n 个特征值(重根算作多个特征值)。

注解

可三角化矩阵是指可以通过相似变换将其化为三角矩阵的矩阵, 也即在一组适当的基底下, 线性变换可以表示为三角矩阵。根据代数基本定理3.4.1, 在复数域上, 任意 n 阶方阵都有 n 个特征值(重根算作多个特征值), 所以任意复数域上的方阵都是可三角化的。但是在实数域上, 并非所有的方阵都是可三角化的, 比如

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

的特征多项式为 $p(\lambda) = \lambda^2 + 1$, 在实数域上没有特征值, 所以 \mathbf{A} 在实数域上是不可三角化矩阵。

5.5.4 对角矩阵与可对角化矩阵

定义 5.5.10 (对角矩阵 Diagonal Matrix). 设 $\mathbf{A} = [a_{ij}] \in F^{m \times n}$, 如果

$$a_{ij} = 0, \quad \forall i \neq j$$

则称 \mathbf{A} 为对角矩阵。

命题 5.5.10 (对角矩阵的主对角元素即为它的特征值). 设 $\mathbf{A} = [a_{ij}] \in F^{n \times n}$ 是一个对角矩阵, 那么 \mathbf{A} 的特征值为其对角元素 $a_{11}, a_{22}, \dots, a_{nn}$ 。

注解

对角矩阵是特殊的三角矩阵, 既可以看成是上三角矩阵, 也可以看成是下三角矩阵。三角矩阵的关于特征值的性质同样适用于对角矩阵。

定义 5.5.11 (可对角化矩阵 Diagonalizable Matrix). 设 $\mathbf{A} \in F^{n \times n}$, 如果存在一个可逆矩阵 $\mathbf{P} \in F^{n \times n}$, 使得

$$\mathbf{P}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{P} = \mathbf{D}$$

其中, \mathbf{D} 是一个对角矩阵, 则称 \mathbf{A} 是可对角化矩阵。

命题 5.5.11 (可对角化矩阵的充要条件). 设 $\mathbf{A} \in F^{n \times n}$, 则 \mathbf{A} 可对角化的充分必要条件是 \mathbf{A} 有 n 个线性无关的特征向量。

证明. 设 $\mathbf{A} \in F^{n \times n}$ 可对角化, 则存在一个可逆矩阵 $\mathbf{P} \in F^{n \times n}$, 使得

$$\mathbf{P}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{P} = \mathbf{D} \iff \mathbf{A}\mathbf{P} = \mathbf{D}\mathbf{P}$$

其中, \mathbf{D} 是一个对角矩阵. 设 \mathbf{D} 的主对角元素为 d_1, d_2, \dots, d_n , 则根据命题 5.5.10 可知, d_1, d_2, \dots, d_n 是 \mathbf{D} 的特征值. 设 $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \dots, \mathbf{e}_n$ 是 F^n 的标准正交基, 则有

$$\mathbf{D}\mathbf{e}_i = d_i\mathbf{e}_i, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

令 $\mathbf{v}_i = \mathbf{P}\mathbf{e}_i$, 则有

$$\mathbf{A}\mathbf{v}_i = \mathbf{A}\mathbf{P}\mathbf{e}_i = \mathbf{D}\mathbf{P}\mathbf{e}_i = d_i\mathbf{P}\mathbf{e}_i = d_i\mathbf{v}_i, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

所以, $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_n$ 是 \mathbf{A} 的 n 个线性无关的特征向量。

反之, 设 $\mathbf{A} \in F^{n \times n}$ 有 n 个线性无关的特征向量 $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_n$, 对应的特征值为 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$. 令 $\mathbf{P} = [\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_n]$, 则 \mathbf{P} 是一个可逆矩阵. 令 \mathbf{D} 为对角矩阵, 其主对角元素为 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$, 则有

$$\mathbf{A}\mathbf{P} = \mathbf{A}[\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_n] = [\mathbf{A}\mathbf{v}_1, \mathbf{A}\mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{A}\mathbf{v}_n] = [\lambda_1\mathbf{v}_1, \lambda_2\mathbf{v}_2, \dots, \lambda_n\mathbf{v}_n] = \mathbf{P}\mathbf{D}$$

所以, $\mathbf{P}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{P} = \mathbf{D}$, 即 \mathbf{A} 可对角化。 □

推论 5.5.3 (矩阵可对角化的充要条件). 矩阵 $\mathbf{A} \in F^{n \times n}$ 可对角化, 有如下等价命题:

1. 存在一个可逆矩阵 $\mathbf{P} \in F^{n \times n}$, 使得 $\mathbf{P}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{P} = \mathbf{D}$, 其中, \mathbf{D} 是一个对角矩阵
2. \mathbf{A} 有 n 个线性无关的特征向量
3. \mathbf{A} 的每个特征值 λ_i 的几何重数等于其代数重数

注解

可对角化矩阵是一种特殊的可三角化矩阵, 是对矩阵的进一步简化. 可对角化的矩阵一定是可三角化的矩阵, 但反之不然. 例如, 上三角矩阵

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

只有一个特征值 1, 对应的特征向量只有一个线性无关的向量 $(1, 0)$, 所以它不可对角化. 可对角化矩阵相比可三角化矩阵, 有更强的约束条件. 可对角化矩阵要求有 n 个线性无关的特征向量, 但并不意味着矩阵有 n 个不同的特征值。

命题 5.5.12 (实对称矩阵是可对角化的矩阵). 设 $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 是一个实对称矩阵, 则 \mathbf{A} 可对角化. 且存在一个正交矩阵 $\mathbf{Q} \in \mathbb{R}^{n \times n}$, 使得

$$\mathbf{Q}^T \mathbf{A} \mathbf{Q} = \mathbf{D}$$

其中, \mathbf{D} 是一个实对角矩阵。

命题 5.5.13 (复厄米矩阵是可对角化的矩阵). 设 $\mathbf{A} \in \mathbb{C}^{n \times n}$ 是一个复厄米矩阵, 则 \mathbf{A} 可对角化. 且存在一个酉矩阵 $\mathbf{U} \in \mathbb{C}^{n \times n}$, 使得

$$\mathbf{U}^H \mathbf{A} \mathbf{U} = \mathbf{D}$$

其中, \mathbf{D} 是一个实对角矩阵。

注解

实对称矩阵和复厄米矩阵都是可对角化的矩阵的充分条件，但不是必要条件。

5.5.5 二次型与对称半定矩阵

定义 5.5.12 (二次型 Quadratic Form). 设 $\mathbf{A} \in F^{n \times n}$, $\mathbf{x} \in F^n$, 则函数

$$f(\mathbf{x}) = \mathbf{x}^T \mathbf{A} \mathbf{x}$$

称为 \mathbf{A} 在变量 \mathbf{x} 上的二次型。

例 5.5.1 (二次型与圆锥曲线). 二维空间中的圆锥曲线的一般形式为:

$$Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F = 0 \quad (5.12)$$

其中, A, B, C, D, E, F 为常数, 用二次型表示为:

$$\begin{bmatrix} x & y & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A & B/2 & D/2 \\ B/2 & C & E/2 \\ D/2 & E/2 & F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (5.13)$$

其中二次项部分:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} x & y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A & B/2 \\ B/2 & C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = Ax^2 + Bxy + Cy^2 \quad (5.14)$$

决定了圆锥曲线的类型:

1. 当 $\det\{\mathbf{A}\} = B^2 - 4AC < 0$ 时, 表示椭圆 (包括圆)
2. 当 $\det\{\mathbf{A}\} = B^2 - 4AC = 0$ 时, 表示抛物线
3. 当 $\det\{\mathbf{A}\} = B^2 - 4AC > 0$ 时, 表示双曲线

定义 5.5.13. 设 $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 是一个实对称矩阵 $\mathbf{A} = \mathbf{A}^T$.

1. \mathbf{A} 是对称半正定 *Symmetric Positive Semi-Definite* 的, 当且仅当, $\forall \mathbf{x} \neq \mathbf{0} \in \mathbb{R}^n$, 有 $\mathbf{x}^T \mathbf{A} \mathbf{x} \geq 0$;
2. \mathbf{A} 是对称正定 *Symmetric Positive Definite* 的, 当且仅当, $\forall \mathbf{x} \neq \mathbf{0} \in \mathbb{R}^n$, 有 $\mathbf{x}^T \mathbf{A} \mathbf{x} > 0$;
3. \mathbf{A} 是对称半负定 *Symmetric Negative Semi-Definite* 的, 当且仅当, $\forall \mathbf{x} \neq \mathbf{0} \in \mathbb{R}^n$, 有 $\mathbf{x}^T \mathbf{A} \mathbf{x} \leq 0$;
4. \mathbf{A} 是对称负定 *Symmetric Negative Definite* 的, 当且仅当, $\forall \mathbf{x} \neq \mathbf{0} \in \mathbb{R}^n$, 有 $\mathbf{x}^T \mathbf{A} \mathbf{x} < 0$ 。

注解

\mathbf{A} 是一个实对称矩阵, 根据命题 5.5.12 可知, \mathbf{A} 可对角化, 且存在正交矩阵 \mathbf{Q} , 使得 $\mathbf{Q}^T \mathbf{A} \mathbf{Q} = \mathbf{D}$, 其中, \mathbf{D} 是一个实对角矩阵。设 \mathbf{D} 的主对角元素为 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$, 是 \mathbf{A} 的 n 个特征值 (重根算作多个特征值)。由此可以得到实对称矩阵正定性的特征值判定法。

命题 5.5.14 (实对称矩阵的正定性的特征值判定法). 设 $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 是一个实对称矩阵, $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ 是 \mathbf{A} 的 n 个特征值 (重根算作多个特征值), 则有:

1. \mathbf{A} 是对称半正定的, 当且仅当, $\forall i = 1, 2, \dots, n$, 有 $\lambda_i \geq 0$;
2. \mathbf{A} 是对称正定的, 当且仅当, $\forall i = 1, 2, \dots, n$, 有 $\lambda_i > 0$;
3. \mathbf{A} 是对称半负定的, 当且仅当, $\forall i = 1, 2, \dots, n$, 有 $\lambda_i \leq 0$;
4. \mathbf{A} 是对称负定的, 当且仅当, $\forall i = 1, 2, \dots, n$, 有 $\lambda_i < 0$ 。

推论 5.5.4. 一个对称正定矩阵和对称负定矩阵的特征值均不为 0, 因此一定是可逆矩阵; 并且如果 \mathbf{A} 是对称正定矩阵, 那么 $-\mathbf{A}$ 是对称负定矩阵。

注解

实对称矩阵的正定性与其特征值的关系, 是判断实对称矩阵正定性的一个重要方法。此外还可以通过实对称矩阵的主子式判定法来判断实对称矩阵的正定性。

定义 5.5.14 (顺序主子矩阵 Leading Principal Submatrix). 设 $\mathbf{A} = [a_{ij}] \in F^{n \times n}$, 则 \mathbf{A} 的 k 阶顺序主子矩阵为

$$\mathbf{A}_k = [a_{ij}]_{i,j=1}^k = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1k} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{k1} & a_{k2} & \cdots & a_{kk} \end{bmatrix} \in F^{k \times k}$$

其中, $k = 1, 2, \dots, n$ 。 \mathbf{A}_k 的行列式 $\det(\mathbf{A}_k)$ 称为 \mathbf{A} 的第 k 阶顺序主子式。

命题 5.5.15 (实对称矩阵的正定性的顺序主子式判定法). 设 $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 是一个实对称矩阵, \mathbf{A}_k 是 \mathbf{A} 的 k 阶顺序主子矩阵, 则有:

1. \mathbf{A} 是对称正定的, 当且仅当, $\forall k = 1, 2, \dots, n$, 有 $\det(\mathbf{A}_k) > 0$;
2. \mathbf{A} 是对称半正定的, 当且仅当, $\forall k = 1, 2, \dots, n$, 有 $\det(\mathbf{A}_k) \geq 0$;
3. \mathbf{A} 是对称负定的, 当且仅当, $\forall k = 1, 2, \dots, n$, 有 $(-1)^k \det(\mathbf{A}_k) > 0$;
4. \mathbf{A} 是对称半负定的, 当且仅当, $\forall k = 1, 2, \dots, n$, 有 $(-1)^k \det(\mathbf{A}_k) \geq 0$ 。

证明.

□

命题 5.5.16 (实对称矩阵的正定性的判定法 3). 设 $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 是一个实对称矩阵, 那么:

1. \mathbf{A} 是对称正定的, 当且仅当, 存在一个可逆矩阵 $\mathbf{P} \in \mathbb{R}^{n \times n}$, 使得 $\mathbf{A} = \mathbf{P}^T \mathbf{P}$;
2. \mathbf{A} 是对称半正定的, 当且仅当, 存在一个矩阵 $\mathbf{P} \in \mathbb{R}^{m \times n}$, 使得 $\mathbf{A} = \mathbf{P}^T \mathbf{P}$;
3. \mathbf{A} 是对称负定的, 当且仅当, 存在一个可逆矩阵 $\mathbf{P} \in \mathbb{R}^{n \times n}$, 使得 $\mathbf{A} = -\mathbf{P}^T \mathbf{P}$;
4. \mathbf{A} 是对称半负定的, 当且仅当, 存在一个矩阵 $\mathbf{P} \in \mathbb{R}^{m \times n}$, 使得 $\mathbf{A} = -\mathbf{P}^T \mathbf{P}$.

证明. 只证明命题 5.5.16 中第 1 条, 第 2、3、4 的证明类似。

$$\begin{aligned} \mathbf{x}^T \mathbf{A} \mathbf{x} &= \mathbf{x}^T \mathbf{P}^T \mathbf{P} \mathbf{x} \\ &= (\mathbf{P} \mathbf{x})^T (\mathbf{P} \mathbf{x}) \\ &= \|\mathbf{P} \mathbf{x}\|_2^2 \end{aligned}$$

因为 \mathbf{P} 是可逆矩阵, 并且 $\mathbf{x} \neq \mathbf{0}$, 所以 $\mathbf{P} \mathbf{x} \neq \mathbf{0}$, 并且 $\|\mathbf{P} \mathbf{x}\|_2^2 > 0$ 。根据定义 5.5.13, \mathbf{A} 是对称正定的。 □

注解

在优化问题中, 二次规划问题中的目标函数通常是一个二次型, 该二次型对应的矩阵是对称正定矩阵, 这样可以保证目标函数是凸函数, 从而保证优化问题有唯一解。

5.6 矩阵分解

5.6.1 LU 分解

定义 5.6.1 (LU 分解). 设 $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$, 如果存在一个下三角矩阵 $\mathbf{L} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 和一个上三角矩阵 $\mathbf{U} \in \mathbb{R}^{n \times n}$, 使得

$$\mathbf{A} = \mathbf{LU}$$

则称 \mathbf{A} 有 LU 分解。

例 5.6.1 (使用 LU 分解求解线性方程组). 设 $\mathbf{A} = \mathbf{LU}$, 则可以将线性方程组 $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$ 转化为两个阶段:

$$\mathbf{Ly} = \mathbf{b}$$

$$\mathbf{Ux} = \mathbf{y}$$

先利用前向替换法求解 \mathbf{y} :

$$y_1 = \frac{b_1}{l_{11}}$$

$$y_i = \frac{1}{l_{ii}} \left[b_i - \sum_{j=1}^{i-1} l_{ij} y_j \right], \quad i = 2, 3, \dots, n$$

再利用后向替换法求解 \mathbf{x} :

$$x_n = \frac{y_n}{u_{nn}}$$

$$x_i = \frac{1}{u_{ii}} \left[y_i - \sum_{j=i+1}^n u_{ij} x_j \right], \quad i = n-1, n-2, \dots, 1$$

这样就可以高效地求解线性方程组 $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$ 。

例 5.6.2 (使用 LU 分解计算行列式). 设 $\mathbf{A} = \mathbf{LU}$, 则行列式可以表示为:

$$\det(\mathbf{A}) = \det(\mathbf{L}) \cdot \det(\mathbf{U})$$

由于 \mathbf{L} 和 \mathbf{U} 都是三角矩阵, 所以它们的行列式等于对角线元素的乘积:

$$\det(\mathbf{L}) = \prod_{i=1}^n l_{ii}, \quad \det(\mathbf{U}) = \prod_{i=1}^n u_{ii}$$

因此, 行列式可以简化为:

$$\det(\mathbf{A}) = \left(\prod_{i=1}^n l_{ii} \right) \left(\prod_{i=1}^n u_{ii} \right)$$

这样就可以高效地计算行列式。

命题 5.6.1 (LU 分解的存在性). 设 $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$,

1. 矩阵能 LU 分解的充分条件: 如果主子式 $\det\{\mathbf{A}_k\}$ 均非零, 那么 \mathbf{A} 能做 LU 分解;
2. 矩阵能 LU 分解的必要条件: 如果矩阵 \mathbf{A} 能做 LU 分解, 那么 \mathbf{A} 可逆。

注解

矩阵的 LU 分解并不总是存在, 但对于大多数实际应用中的矩阵, LU 分解是可行且高效的。通常使用高斯消元法、Doolittle 方法或 Crout 方法来计算 LU 分解。

5.6.2 Cholesky 分解

命题 5.6.2 (Cholesky 分解). 设 $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 是对称正定矩阵, 则存在唯一的下三角矩阵 $\mathbf{L} \in \mathbb{R}^{n \times n}$, 使得

$$\mathbf{A} = \mathbf{L}\mathbf{L}^T$$

该分解称为 *Cholesky 分解*。

注解

Cholesky 分解是一种特殊的 LU 分解, 适用于对称正定矩阵。Cholesky 分解的计算效率高于一的 LU 分解, 因为它只需要计算一半的矩阵元素。Cholesky 分解分为两步:

1. 计算下三角矩阵 \mathbf{L} 的对角线元素:

$$l_{ii} = \sqrt{a_{ii} - \sum_{k=1}^{i-1} l_{ik}^2}, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

2. 计算下三角矩阵 \mathbf{L} 的非对角线元素:

$$l_{ij} = \frac{1}{l_{jj}} \left(a_{ij} - \sum_{k=1}^{j-1} l_{ik} l_{jk} \right), \quad i = j+1, j+2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n-1$$

5.6.3 QR 分解

命题 5.6.3 (QR 分解). 任何矩阵 $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{m \times n}$ 都可以分解为一个正交矩阵 $\mathbf{Q} \in \mathbb{R}^{m \times m}$ 和一个上三角矩阵 $\mathbf{R} \in \mathbb{R}^{m \times n}$ 的乘积, 即

$$\mathbf{A} = \mathbf{Q}\mathbf{R}$$

该分解称为 *QR 分解*。

证明. 设 $\mathbf{A} = [\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_n]$, 使用 Gram-Schmidt 正交化 5.1.7 过程构造正交矩阵 \mathbf{Q} :

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_1 &= \mathbf{a}_1 \\ \mathbf{e}_1 &= \frac{\mathbf{u}_1}{\|\mathbf{u}_1\|} \\ \mathbf{u}_2 &= \mathbf{a}_2 - (\mathbf{a}_2 \cdot \mathbf{e}_1)\mathbf{e}_1 \\ \mathbf{e}_2 &= \frac{\mathbf{u}_2}{\|\mathbf{u}_2\|} \\ &\vdots \\ \mathbf{u}_n &= \mathbf{a}_n - \sum_{j=1}^{n-1} (\mathbf{a}_n \cdot \mathbf{e}_j)\mathbf{e}_j \\ \mathbf{e}_n &= \frac{\mathbf{u}_n}{\|\mathbf{u}_n\|} \end{aligned}$$

其中, $\{\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \dots, \mathbf{e}_n\}$ 是正交归一化后的向量组, 构成正交矩阵 $\mathbf{Q} = [\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \dots, \mathbf{e}_m]$ 。

接下来, 构造上三角矩阵 \mathbf{R} :

$$r_{ij} = \begin{cases} \mathbf{a}_j \cdot \mathbf{e}_i, & i \leq j \\ 0, & i > j \end{cases}$$

这样, \mathbf{R} 是一个上三角矩阵。

最后, 可以验证 $\mathbf{A} = \mathbf{QR}$:

$$\mathbf{A} = [\mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{a}_n] = \left[\sum_{i=1}^m r_{i1} \mathbf{e}_i, \dots, \sum_{i=1}^m r_{in} \mathbf{e}_i \right] = \mathbf{QR}$$

□

5.6.4 特征值分解

定义 5.6.2 (特征值分解 Eigenvalue Decomposition). 设 $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$, 如果存在一个可逆矩阵 $\mathbf{P} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 和一个对角矩阵 $\mathbf{D} \in \mathbb{R}^{n \times n}$, 使得

$$\mathbf{A} = \mathbf{P} \mathbf{D} \mathbf{P}^{-1}$$

则称 \mathbf{A} 有特征值分解。

注解

矩阵的特征值分解与可对角化矩阵的定义 5.5.11 等价。能特征值分解的矩阵与可对角化矩阵的条件相同, 即矩阵 \mathbf{A} 有 n 个线性无关的特征向量。

5.6.5 奇异值分解

命题 5.6.4 (奇异值分解 Singular Value Decomposition). 任意矩阵 $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{m \times n}$ 都可以分解为:

$$\mathbf{A} = \mathbf{U} \mathbf{\Sigma} \mathbf{V}^T$$

其中,

1. $\mathbf{U} \in \mathbb{R}^{m \times m}$ 是正交矩阵, 其中的列向量称为左奇异向量;
2. $\mathbf{V} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 是正交矩阵, 其中的列向量称为右奇异向量;
3. $\mathbf{\Sigma} \in \mathbb{R}^{m \times n}$ 是对角矩阵, 对角线上的元素称为奇异值, 所有奇异值均为非负实数。

证明. $\mathbf{A}^T \mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 是一个对称矩阵, 根据命题 5.5.12, $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$ 是可对角化矩阵, 且存在一个正交矩阵 $\mathbf{V} \in \mathbb{R}^{n \times n}$, 使得

$$\mathbf{A}^T \mathbf{A} = \mathbf{V} \mathbf{\Lambda} \mathbf{V}^T$$

其中, $\mathbf{\Lambda}$ 是对角矩阵, 对角线上的元素为 $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$ 的特征值。根据命题 5.5.16, $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$ 是半正定矩阵, 所以其特征值非负。设 $\mathbf{\Sigma} = [\sigma_{ij}] \in \mathbb{R}^{m \times n}$ 是一个对角矩阵, 对角线元素为 $\sigma_{ii} = \sqrt{\lambda_i}$, 其中 λ_i 是 $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$ 的第 i 个特征值, 那么令矩阵 \mathbf{U} 满足:

$$\mathbf{U} \mathbf{\Sigma} = \mathbf{A} \mathbf{V} \in \mathbb{R}^{m \times n} \quad (5.15)$$

那么:

$$\Sigma^T \mathbf{U}^T = \mathbf{V}^T \mathbf{A}^T \in \mathbb{R}^{n \times m} \quad (5.16)$$

将等式 5.15 和 5.16 等式左右两边分别相乘得:

$$\mathbf{U} \Sigma \Sigma^T \mathbf{U}^T = \mathbf{A} \mathbf{V} \mathbf{V}^T \mathbf{A}^T$$

$$\mathbf{U} \mathbf{\Lambda}' \mathbf{U}^T = \mathbf{A} \mathbf{A}^T$$

其中, $\mathbf{\Lambda}' \in \mathbb{R}^{m \times m}$ 是对角矩阵, 对角线元素为 $\sigma_{ii}^2 = \lambda_i$; $\mathbf{A} \mathbf{A}^T$ 也是对称半正定矩阵, 根据命题 5.5.12, \mathbf{U} 是正交矩阵。因此, $\mathbf{A} = \mathbf{U} \Sigma \mathbf{V}^T$, 其中 \mathbf{U} 和 \mathbf{V} 是正交矩阵, Σ 是对角矩阵, 并且奇异值 $\sigma_{ii} = \sqrt{\lambda_i} \geq 0$ 。□

推论 5.6.1 (奇异值分解与特征值分解的关系). 设 $\mathbf{A} = \mathbf{U} \Sigma \mathbf{V}^T$ 那么:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}^T \mathbf{A} &= [\mathbf{U} \Sigma \mathbf{V}^T]^T [\mathbf{U} \Sigma \mathbf{V}^T] \\ &= \mathbf{V} \Sigma^T \mathbf{U}^T \mathbf{U} \Sigma \mathbf{V}^T \\ &= \mathbf{V} \Sigma^T \Sigma \mathbf{V}^T \\ &= \mathbf{V} \Sigma^2 \mathbf{V}^T \end{aligned}$$

同理可得:

$$\begin{aligned} \mathbf{A} \mathbf{A}^T &= [\mathbf{U} \Sigma \mathbf{V}^T] [\mathbf{U} \Sigma \mathbf{V}^T]^T \\ &= \mathbf{U} \Sigma \mathbf{V}^T \mathbf{V} \Sigma^T \mathbf{U}^T \\ &= \mathbf{U} \Sigma \Sigma^T \mathbf{U}^T \\ &= \mathbf{U} \Sigma^2 \mathbf{U}^T \end{aligned}$$

注解

奇异值分解相比特征值分解更为通用, 因为它适用于任意矩阵, 而不仅限于方阵。奇异值分解中, \mathbf{U} 和 \mathbf{V} 是正交矩阵, 表示刚性变换, 不改变向量的长度和夹角, Σ 是对角矩阵, 表示拉伸或压缩变化。

5.6.6 极分解

命题 5.6.5 (极分解 Polar Decomposition). 任意 $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 都可以分解为:

$$\mathbf{A} = \mathbf{O} \mathbf{R}$$

或

$$\mathbf{A} = \mathbf{L} \mathbf{O}$$

其中, $\mathbf{O} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 是一个正交矩阵, $\mathbf{L}, \mathbf{R} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 是对称半正定矩阵。称为矩阵的**极分解**。

证明. 设矩阵 \mathbf{A} 的奇异值 $\mathbf{A} = \mathbf{U} \Sigma \mathbf{V}^T$, 那么:

$$\mathbf{A} = (\mathbf{U} \mathbf{V}^T) (\mathbf{V} \Sigma \mathbf{V}^T)$$

令, $\mathbf{O} = \mathbf{U}\mathbf{V}^T$, 满足:

$$\mathbf{O}\mathbf{O}^T = \mathbf{U}\mathbf{V}^T\mathbf{V}\mathbf{U}^T = \mathbf{I}$$

是正交矩阵。令

$$\mathbf{R} = \mathbf{V}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T$$

则 \mathbf{R} 是对称半正定矩阵。类似地, 可以得到 $\mathbf{A} = \mathbf{L}\mathbf{O}$ 的分解形式。其中, $\mathbf{L} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{U}^T$ 也是对称半正定矩阵。□

命题 5.6.6. 矩阵 \mathbf{A} 的极分解中, \mathbf{L}, \mathbf{R} 满足如下关系:

$$\mathbf{L} = \mathbf{A}\mathbf{O}^{-1} = \mathbf{O}\mathbf{R}\mathbf{O}^T$$

$$\mathbf{R} = \mathbf{O}^{-1}\mathbf{A} = \mathbf{O}^T\mathbf{L}\mathbf{O}$$

因此, \mathbf{L} 和 \mathbf{R} 是相似矩阵。

注解

极分解可以看成是奇异值分解的一种特殊情况。

5.7 指标记号

下面介绍一种简化线性元素及其运算书写的**指标记号** **Indicial notation**。

5.7.1 自由指标

自由指标：在表达式的一项 **Term** 中，只出现一次的指标，可以是上标，也可以是下标。表示该表达式在该指标的取值范围内都成立。例如：一个 n 维向量 $\mathbf{v} \in F^n$ 可以写成有序数组的形式：

$$\mathbf{v} = (v_1, v_2, \dots, v_n)$$

写成自由指标的形式为：

$$v_i, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

这里的 i 就是一个自由指标，表示 \mathbf{v} 的第 i 个分量。再比如，一个 $m \times n$ 的矩阵 $\mathbf{A} \in F^{m \times n}$ 可以写成：

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix}$$

写成自由指标的形式为：

$$a_{ij} = a^{ij} = a_i^j = a_j^i, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n$$

这里的 i 和 j 就是自由指标，分别表示矩阵 \mathbf{A} 的第 i 行和第 j 列的元素。再比如，一个三指标的张量 $\mathbf{T} \in F^{m \times n \times p}$ 用自由指标可以写成：

$$t_{ijk} = t^{ijk} = t_i^{jk} = t_j^{ik} = t_k^{ij} = t_{ik}^j = t_{jk}^i = t_{ij}^k$$

$$i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad k = 1, 2, \dots, p$$

这里的 i 、 j 和 k 就是自由指标，分别表示张量 \mathbf{T} 的第 i 行、第 j 列和第 k 层的元素。

5.7.2 哑指标求和约定

哑指标：在表达式的一项中，出现两次的指标，可以是上标，也可以是下标。表示该指标在该表达式中被求和。哑标自动求和也称为**爱因斯坦求和约定** **Einstein summation convention**。比如，一个 n 维向量用基 \mathbf{e}_i 线性表出：

$$\mathbf{v} = \sum_{i=1}^n v^i \mathbf{e}_i$$

用哑指标求和约定可以写成：

$$\mathbf{v} = v^i \mathbf{e}_i$$

这里的 i 就是一个哑指标，表示对 i 从 1 到 n 求和。省略了求和符号 \sum 。再比如，在 F^n 内积空间中，两个向量 $\mathbf{u}, \mathbf{v} \in F^n$ 的内积可以写成：

$$\mathbf{u} \cdot \mathbf{v} = \sum_{i=1}^n u_i v^i$$

用哑指标求和约定可以写成:

$$\mathbf{u} \cdot \mathbf{v} = u_i v^i$$

再比如, 一个 $m \times n$ 的矩阵 $\mathbf{A} \in F^{m \times n}$ 作用在一个 n 维向量 $\mathbf{v} \in F^n$ 用矩阵乘法表示为:

$$\mathbf{A}\mathbf{v} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix}$$

用哑指标求和约定可以写成:

$$(\mathbf{A}\mathbf{v})_i = a_{ij} v^j$$

这里的 j 就是一个哑指标, 表示对 j 从 1 到 n 求和, 省略了求和符号 \sum 。而 i 是一个自由指标, 表示结果向量 $\mathbf{A}\mathbf{v}$ 的第 i 个分量。再比如, 矩阵的迹用哑指标求和约定可以写成:

$$\text{tr}(\mathbf{A}) = a_i^i = a^i_i = a_{ii}$$

表示对角线元素求和。

5.7.3 克罗内克符号

定义 5.7.1 (克罗内克符号 Kronecker delta). : 设一个两指标的数, 可以记为 $\delta_{ij} = \delta^{ij} = \delta^i_j = \delta^j_i$:

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases}$$

例 5.7.1. 通过克罗内克符号, 矩阵的迹还可以表示为:

$$\text{tr}(\mathbf{A}) = a^{ij} \delta_{ij} = a^i_i = a^j_j$$

定义 5.7.2 (广义克罗内克符号 Generalized Kronecker delta). : 设一个 n 指标的数, 可以记为 $\delta_{j_1 j_2 \dots j_n}^{i_1 i_2 \dots i_n}$, 定义为:

$$\delta_{j_1 j_2 \dots j_n}^{i_1 i_2 \dots i_n} = \begin{cases} +1, & (j_1, j_2, \dots, j_n) \text{ 是 } (i_1, i_2, \dots, i_n) \text{ 的偶排列} \\ -1, & (j_1, j_2, \dots, j_n) \text{ 是 } (i_1, i_2, \dots, i_n) \text{ 的奇排列} \\ 0, & (j_1, j_2, \dots, j_n) \text{ 既非偶排列也不是奇排列} \end{cases}$$

例 5.7.2. 通过广义克罗内克符号, 行列式的展开式还可以表示为:

$$\begin{aligned} \det(\mathbf{A}) &= \sum_{\sigma \in S_n} \left(\text{sgn}(\sigma) \prod_{i=1}^n a_{i, \sigma(i)} \right) \\ &= \sum_{(j_1, \dots, j_n) \in S_n} \delta_{j_1 j_2 \dots j_n}^{12 \dots n} a_1^{j_1} \cdots a_n^{j_n} \end{aligned}$$

其中, $(j_1, \dots, j_n) \in S_n$ 是 $1, 2, \dots, n$ 的一个排列。

5.8 张量代数

5.8.1 多重线性泛函

定义 5.8.1 (线性泛函 Linear Functional). 设 V 是一个 F -线性空间, F 本身也可以看成一个 F -线性空间, 那么 $T: V \rightarrow F$ 的线性映射称为**线性泛函**。

定义 5.8.2 (多重线性泛函 Multilinear Functional). 设 V_1, V_2, \dots, V_n 是 F -线性空间, F 本身也可以看成一个 F -线性空间, 那么 $T: V_1 \times V_2 \times \dots \times V_n \rightarrow F$ 的映射称为**多重线性泛函**, 当且仅当, 对于任意的 $i = 1, 2, \dots, n$, T 满足:

1. $\forall \mathbf{v}_i, \mathbf{u}_i \in V_i, T(\dots, \mathbf{v}_i + \mathbf{u}_i, \dots) = T(\dots, \mathbf{v}_i, \dots) + T(\dots, \mathbf{u}_i, \dots)$
2. $\forall \mathbf{v}_i \in V_i, \forall r \in F, T(\dots, r\mathbf{v}_i, \dots) = rT(\dots, \mathbf{v}_i, \dots)$

全体多重线性泛函的集合记为 $\mathcal{L}(V_1, V_2, \dots, V_n; F)$ 。

定义 5.8.3 (多重线性泛函的加法). $\forall T_1, T_2 \in \mathcal{L}(V_1, V_2, \dots, V_n; F)$, 定义其和为

$$(T_1 + T_2)(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_n) = T_1(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_n) + T_2(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_n)$$

定义 5.8.4 (多重线性泛函的数乘). $\forall T \in \mathcal{L}(V_1, V_2, \dots, V_n; F), \forall r \in F$, 定义其数乘为

$$(rT)(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_n) = rT(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_n)$$

命题 5.8.1 (全体多重线性泛函构成一个线性空间). $\mathcal{L}(V_1, V_2, \dots, V_n; F)$ 在加法 5.8.3 和数乘 5.8.4 下是一个 F -线性空间。其维数为

$$\dim \mathcal{L}(V_1, V_2, \dots, V_n; F) = \dim V_1 \cdot \dim V_2 \cdots \dim V_n$$

注解

多重线性泛函是对线性泛函的推广, 它对每个变量都是线性的。全体多重线性泛函构成一个线性空间, 其维数是各个线性空间维数的乘积。

5.8.2 对偶线性空间

定义 5.8.5 (对偶线性空间 Dual Linear Space). 设 V 是一个 F -线性空间, 则所有从 V 到 F 的线性泛函构成的集合 $\mathcal{L}(V, F)$ 也是个线性空间, 称为 V 的**对偶线性空间**, 记为 V^* 。 V^* 中的元素称为 V 的**对偶向量 Dual Vector** 或**余向量 Covector**。

命题 5.8.2 (线性空间与其对偶空间是自然同构的). 设 V 是一个有限维 F -线性空间。 V^* 是 V 的对偶空间。 因为 $V^* = \mathcal{L}(V, F)$, 所以 $\dim V^* = \dim \mathcal{L}(V, F) = \dim V \cdot \dim F = \dim V$, 也即 V 与其对偶空间 V^* 是同构的。

例 5.8.1. 行向量空间 $F^{1 \times n}$ 通过矩阵乘法可以定义一个线性泛函:

$$\begin{bmatrix} a_1 & a_2 & \cdots & a_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^n a_i b_i \in F$$

其中,

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} : F^{1 \times n} \rightarrow F$$

那么全体列向量空间 $F^{n \times 1}$ 是行向量空间 $F^{1 \times n}$ 的对偶空间, $F^{n \times 1} \cong (F^{1 \times n})^*$ 。

例 5.8.2. 设 $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ 是一个 n 维 F -内积空间, 通过内积运算可以定义一个线性泛函:

$$f(\mathbf{v}) = \langle \mathbf{u}, \mathbf{v} \rangle, \quad \forall \mathbf{v} \in V$$

其中,

$$\langle \mathbf{u}, \cdot \rangle : V \rightarrow F, \quad \mathbf{u} \in V$$

是一个线性泛函, 那么全体这样的线性泛函构成的集合:

$$V^* = \{ \langle \mathbf{u}, \cdot \rangle : \mathbf{u} \in V \}$$

那么 V^* 就是 V 的对偶空间, $V^* \cong V$ 。

注解

线性空间与其对偶空间是自然同构的, 线性空间本也可以看成其对偶空间的对偶空间, 也即 $(V^*)^* = V$ 。

5.8.3 张量的定义

定义 5.8.6 (张量 Tensor). 设 V 是一个 F -线性空间, V^* 是 V 的对偶空间。则 V 的 (r, s) 型张量是一个多重线性泛函 $T \in \mathcal{L}(\underbrace{V^*, V^*, \dots, V^*}_{r \text{ 个}}, \underbrace{V, V, \dots, V}_{s \text{ 个}}; F)$:

$$T(\underbrace{\omega^1, \omega^2, \dots, \omega^r}_{r \text{ 个}}, \underbrace{\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_s}_{s \text{ 个}})$$

全体 (r, s) 型张量的集合记为 V_s^r 。

注解

张量是一种特殊的多重线性泛函, 它的前 r 个变量是对偶空间 V^* 中的向量, 后 s 个变量是线性空间 V 中的向量。 V_s^r 是 $\mathcal{L}(\underbrace{V^*, V^*, \dots, V^*}_{r \text{ 个}}, \underbrace{V, V, \dots, V}_{s \text{ 个}}; F)$ 的线性子空间。张量空间的维数为 $\dim V_s^r = (\dim V)^{r+s}$ 。如果 $\dim V = n$, 则 $\dim V_s^r = n^{r+s}$ 。

定义 5.8.7 (张量积 Tensor Product). 设 V 是一个 F -线性空间, V^* 是 V 的对偶空间。 $T \in V_s^r$, $S \in V_q^p$, 则定义 T 和 S 的张量积为 $T \otimes S \in V_{s+q}^{r+p}$, 那么:

$$(T \otimes S)(\underbrace{\omega^1, \dots, \omega^{r+p}}_{r+p \text{ 个}}, \underbrace{\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_{s+q}}_{s+q \text{ 个}}) = T(\omega^1, \dots, \omega^r, \mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_s) \cdot S(\omega^{r+1}, \dots, \omega^{r+p}, \mathbf{v}_{s+1}, \dots, \mathbf{v}_{s+q})$$

命题 5.8.3 (张量积的性质). 设 V 是一个 F -线性空间, V^* 是 V 的对偶空间。 $T, T_1, T_2 \in V_s^r$, $S, S_1, S_2 \in V_q^p$, $a \in F$, 则有:

1. 结合律: $(T \otimes S) \otimes R = T \otimes (S \otimes R)$
2. 分配律: $(T_1 + T_2) \otimes S = T_1 \otimes S + T_2 \otimes S$
3. 分配律: $T \otimes (S_1 + S_2) = T \otimes S_1 + T \otimes S_2$
4. 数乘结合律: $(aT) \otimes S = a(T \otimes S) = T \otimes (aS)$

定义 5.8.8 (简单张量 Simple Tensor). 设 V 是一个 F -线性空间, V^* 是 V 的对偶空间。如果存在 $\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_r \in V$, $\mathbf{u}_1^*, \dots, \mathbf{u}_s^* \in V^*$, 得到 (r, s) 型张量:

$$\begin{aligned} \mathbf{T}(\mathbf{v}_1^*, \dots, \mathbf{v}_r^*, \mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_s) &:= \mathbf{u}_1 \otimes \dots \otimes \mathbf{u}_r \otimes \mathbf{u}_1^* \otimes \dots \otimes \mathbf{u}_s^* (\mathbf{v}_1^*, \dots, \mathbf{v}_r^*, \mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_s) \\ &= \mathbf{u}_1(\mathbf{v}_1^*) \dots \mathbf{u}_r(\mathbf{v}_r^*) \mathbf{u}_1^*(\mathbf{v}_1) \dots \mathbf{u}_s^*(\mathbf{v}_s) \end{aligned}$$

则称 T 为一个简单张量。

注解

张量积是构造张量的一种重要方法。将两个低阶张量通过张量积可以得到一个更高阶的张量。

5.8.4 协变基与逆变基

定义 5.8.9 (协变基与逆变基 Covariant and Contravariant Basis). 设 V 是一个 n 维 F -线性空间, $\{\mathbf{e}_i : i = 1, \dots, n\}$ 是 V 的一组基, V^* 是 V 的对偶空间, $\{\mathbf{e}^j : j = 1, \dots, n\}$ 是 V^* 的一组基, 使得

$$\mathbf{e}^j(\mathbf{e}_i) = \delta_i^j$$

则称 \mathbf{e}_i 为 V 的协变基 *Covariant Basis*, 称 \mathbf{e}^j 为 V^* 的逆变基 *Contravariant Basis*。

注解

协变基是线性空间 V 的任意一组基, 逆变基是对偶空间中的一组基, 它们满足 $\mathbf{e}^i(\mathbf{e}_j) = \delta_j^i$ 。这里的 δ_j^i 是克罗内克符号 5.7.1。 i, j 是自由指标, 通常, 我们约定下指标表示协变基, 上指标表示逆变基。

定义 5.8.10 (协变分量与逆变分量 Covariant and Contravariant Components). 设 V 是一个 n 维 F -线性空间, $\{\mathbf{e}_i : i = 1, \dots, n\}$ 是协变基, V^* 是 V 的对偶空间, $\{\mathbf{e}^j : j = 1, \dots, n\}$ 是逆变基。则任意 $\mathbf{v} \in V$ 和 $\omega \in V^*$ 可以表示为:

$$\mathbf{v} = v^i \mathbf{e}_i, \quad \omega = \omega_j \mathbf{e}^j$$

其中,

$$v^i = \mathbf{e}^i(\mathbf{v}) = \mathbf{e}^i(v^k \mathbf{e}_k) = v^k \mathbf{e}^i(\mathbf{e}_k) = v^k \delta_k^i = v^i$$

称为 $\mathbf{v} \in V$ 在协变基 \mathbf{e}_i 下的**逆变分量 Contravariant Component**。

$$\omega_j = \mathbf{e}_j(\omega) = \mathbf{e}_j(\omega_k \mathbf{e}^k) = \omega_k \mathbf{e}_j(\mathbf{e}^k) = \omega_k \delta_j^k = \omega_j$$

称为 $\omega \in V^*$ 在逆变基 \mathbf{e}^j 下的**协变分量 Covariant Component**。

注解

协变分量是对偶空间 V^* 中向量在逆变基下的分量, 逆变分量是线性空间 V 中向量在协变基下的分量。这里的 i, j 是自由指标, 通常, 我们约定下指标表示协变分量, 上指标表示逆变分量。

定义 5.8.11 (张量的分量表示). 设 V 是一个 n 维 F -线性空间, $\{\mathbf{e}_i : i = 1, \dots, n\}$ 是协变基, V^* 是 V 的对偶空间, $\{\mathbf{e}^j : j = 1, \dots, n\}$ 是逆变基。对于任意 (r, s) 型张量 $T \in V_s^r$:

$$T(\omega^1, \dots, \omega^r, \mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_s)$$

其中 $\omega^1, \dots, \omega^r \in V^*$ 用逆变基线性表出:

$$\begin{aligned} \omega^1 &= \omega_{j_1}^1 \mathbf{e}^{j_1}, & \omega_{j_1}^1 &= \mathbf{e}_{j_1}(\omega^1) \\ \omega^2 &= \omega_{j_2}^2 \mathbf{e}^{j_2}, & \omega_{j_2}^2 &= \mathbf{e}_{j_2}(\omega^2) \\ &\vdots \\ \omega^r &= \omega_{j_r}^r \mathbf{e}^{j_r}, & \omega_{j_r}^r &= \mathbf{e}_{j_r}(\omega^r) \end{aligned}$$

$\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_s \in V$ 用协变基线性表出:

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_1 &= v_1^{i_1} \mathbf{e}_{i_1}, & v_1^{i_1} &= \mathbf{e}^{i_1}(\mathbf{v}_1) \\ \mathbf{v}_2 &= v_2^{i_2} \mathbf{e}_{i_2}, & v_2^{i_2} &= \mathbf{e}^{i_2}(\mathbf{v}_2) \\ &\vdots \\ \mathbf{v}_s &= v_s^{i_s} \mathbf{e}_{i_s}, & v_s^{i_s} &= \mathbf{e}^{i_s}(\mathbf{v}_s) \end{aligned}$$

代入 (r, s) 型张量 T 中, 得到:

$$\begin{aligned} &T(\omega^1, \dots, \omega^r, \mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_s) \\ &= T(\omega_{j_1}^1 \mathbf{e}^{j_1}, \dots, \omega_{j_r}^r \mathbf{e}^{j_r}, v_1^{i_1} \mathbf{e}_{i_1}, \dots, v_s^{i_s} \mathbf{e}_{i_s}) \\ &= \omega_{j_1}^1 \cdots \omega_{j_r}^r v_1^{i_1} \cdots v_s^{i_s} T(\mathbf{e}^{j_1}, \dots, \mathbf{e}^{j_r}, \mathbf{e}_{i_1}, \dots, \mathbf{e}_{i_s}) \\ &= \mathbf{e}_{j_1}(\omega^1) \cdots \mathbf{e}_{j_r}(\omega^r) \mathbf{e}^{i_1}(\mathbf{v}_1) \cdots \mathbf{e}^{i_s}(\mathbf{v}_s) T(\mathbf{e}^{j_1}, \dots, \mathbf{e}^{j_r}, \mathbf{e}_{i_1}, \dots, \mathbf{e}_{i_s}) \\ &= T(\mathbf{e}^{j_1}, \dots, \mathbf{e}^{j_r}, \mathbf{e}_{i_1}, \dots, \mathbf{e}_{i_s}) \mathbf{e}_{j_1} \otimes \cdots \otimes \mathbf{e}_{j_r} \otimes \mathbf{e}^{i_1} \otimes \cdots \otimes \mathbf{e}^{i_s} (\omega^1, \dots, \omega^r, \mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_s) \end{aligned}$$

其中, $T(\mathbf{e}^{j_1}, \dots, \mathbf{e}^{j_r}, \mathbf{e}_{i_1}, \dots, \mathbf{e}_{i_s})$ 称为张量 T 在基 $\mathbf{e}_{j_1} \otimes \dots \otimes \mathbf{e}_{j_r} \otimes \mathbf{e}^{i_1} \otimes \dots \otimes \mathbf{e}^{i_s}$ 下的分量, 记为 $T_{i_1 i_2 \dots i_r}^{j_1 j_2 \dots j_s}$ 。这是一个 $r+s$ 个指标的多重数组, i_1, i_2, \dots, i_r 是上自由指标, j_1, j_2, \dots, j_s 是下自由指标, 一共表示 n^{r+s} 个分量。

注解

张量的分量表示是将张量作用在基向量上得到的结果。在例 5.8.3 中, 一个 $(1,1)$ 型张量的分量记为 T_i^j , 可以用 $n \times n$ 的矩阵把每个分量都表示出来。对于更高阶的张量, 其全部分量需要一个多维数组表示, 不方便书写, 只能用指标记号简记。

例 5.8.3 (并矢 Dyadics). 设 $\mathbb{R}^{1 \times n}$ 与其对偶空间 $\mathbb{R}^{n \times 1}$, 任意行向量:

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} a^1 & a^2 & \dots & a^n \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{1 \times n}$$

与任意列向量:

$$\mathbf{b}^* = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$$

\mathbf{a}, \mathbf{b}^* 的张量积记为 $\mathbf{a} \otimes \mathbf{b}^*$ 称为并矢:

$$\begin{aligned} \mathbf{a} \otimes \mathbf{b}^*(\mathbf{v}^*, \mathbf{u}) &= \mathbf{a}(\mathbf{v}^*)\mathbf{b}^*(\mathbf{u}) \\ &= \begin{bmatrix} a^1 & a^2 & \dots & a^n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u^1 & u^2 & \dots & u^n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} u_1 & u_2 & \dots & u_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 a^1 & b_1 a^2 & \dots & b_1 a^n \\ b_2 a^1 & b_2 a^2 & \dots & b_2 a^n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_n a^1 & b_n a^2 & \dots & b_n a^n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix} \end{aligned}$$

因此一个 $(1,1)$ 型张量 $T \in (\mathbb{R}^n)_1^1$ 可以表示为一个 $n \times n$ 的矩阵的二次型。

注解

其中, a^j 可以看成 $\mathbf{a} \in \mathbb{R}^{1 \times n}$ 在协变基下的逆变分量; b_i 可以看成 $\mathbf{b}^* \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ 在逆变基下的协变分量。并矢是一个 $(1,1)$ 型张量, 在这组协变逆变基下, 可以用 $n \times n$ 的矩阵表示, $b_i a^j$ 是它的分量。

5.8.5 张量的缩并

定义 5.8.12 (缩并 Contraction). 设 V 是一个 n 维 F -线性空间, $\{\mathbf{e}_i : i = 1, \dots, n\}$ 是协变基, V^* 是 V 的对偶空间, $\{\mathbf{e}^j : j = 1, \dots, n\}$ 是逆变基。对于任意 (r,s) 型张量 $T \in V_s^r$, 用分量表示为:

$$T(\omega^1, \dots, \omega^r, \mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_s) = T_{i_1 i_2 \dots i_r}^{j_1 j_2 \dots j_s} \mathbf{e}_{j_1} \otimes \dots \otimes \mathbf{e}_{j_r} \otimes \mathbf{e}^{i_1} \otimes \dots \otimes \mathbf{e}^{i_s}(\omega^1, \dots, \omega^r, \mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_s)$$

设函数 $C_\nu^\mu : V_s^r \rightarrow V_{s-1}^{r-1}$ 称为缩并操作, 其中, $\mu = 1, \dots, r$, $\nu = 1, \dots, s$ 表示将逆变基 \mathbf{e}^k 输入张量 T 的第 μ 个上槽位, 将协变基 \mathbf{e}_k 输入张量 T 的第 ν 个下槽, 并求和得到一个 $(r-1, s-1)$ 型张量:

$$\begin{aligned}
 C_\nu^\mu(T) &:= \sum_{r=1}^n T(\omega^1, \dots, \omega^{\mu-1}, \mathbf{e}^k, \omega^{\mu+1}, \dots, \omega^r, \mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_{\nu-1}, \mathbf{e}_k, \mathbf{v}_{\nu+1}, \dots, \mathbf{v}_s) \\
 &= \sum_{k=1}^n T_{i_1 i_2 \dots i_r}^{j_1 j_2 \dots j_s} \mathbf{e}_{j_1}(\omega^1) \cdots \mathbf{e}_{j_{\mu-1}}(\omega^{\mu-1}) \mathbf{e}_{j_\mu}(\mathbf{e}^k) \mathbf{e}_{j_{\mu+1}}(\omega^{\mu+1}) \cdots \mathbf{e}_{j_r}(\omega^r) \\
 &\quad \mathbf{e}^{i_1}(\mathbf{v}_1) \cdots \mathbf{e}^{i_{\nu-1}}(\mathbf{v}_{\nu-1}) \mathbf{e}^{i_\nu}(\mathbf{e}_k) \mathbf{e}^{i_{\nu+1}}(\mathbf{v}_{\nu+1}) \cdots \mathbf{e}^{i_s}(\mathbf{v}_s) \\
 &= \sum_{k=1}^n T_{i_1 i_2 \dots i_r}^{j_1 j_2 \dots j_s} \mathbf{e}_{j_1}(\omega^1) \cdots \mathbf{e}_{j_{\mu-1}}(\omega^{\mu-1}) \delta_{j_\mu}^k \mathbf{e}_{j_{\mu+1}}(\omega^{\mu+1}) \cdots \mathbf{e}_{j_r}(\omega^r) \\
 &\quad \mathbf{e}^{i_1}(\mathbf{v}_1) \cdots \mathbf{e}^{i_{\nu-1}}(\mathbf{v}_{\nu-1}) \delta_k^{i_\nu} \mathbf{e}^{i_{\nu+1}}(\mathbf{v}_{\nu+1}) \cdots \mathbf{e}^{i_s}(\mathbf{v}_s) \\
 &= T_{i_1 i_2 \dots i_r}^{j_1 j_2 \dots j_s} \delta_{j_\mu}^{i_\nu} \mathbf{e}_{j_1}(\omega^1) \cdots \mathbf{e}_{j_{\mu-1}}(\omega^{\mu-1}) \mathbf{e}_{j_{\mu+1}}(\omega^{\mu+1}) \cdots \mathbf{e}_{j_r}(\omega^r) \\
 &\quad \mathbf{e}^{i_1}(\mathbf{v}_1) \cdots \mathbf{e}^{i_{\nu-1}}(\mathbf{v}_{\nu-1}) \mathbf{e}^{i_{\nu+1}}(\mathbf{v}_{\nu+1}) \cdots \mathbf{e}^{i_s}(\mathbf{v}_s) \\
 &= T_{i_1 i_2 \dots i_r}^{j_1 j_2 \dots j_s} \delta_{j_\mu}^{i_\nu} \mathbf{e}_{j_1} \otimes \cdots \otimes \mathbf{e}_{j_{\mu-1}} \otimes \mathbf{e}_{j_{\mu+1}} \otimes \cdots \otimes \mathbf{e}_{j_r} \\
 &\quad \mathbf{e}^{i_1} \otimes \cdots \otimes \mathbf{e}^{i_{\nu-1}} \otimes \mathbf{e}^{i_{\nu+1}} \otimes \cdots \otimes \mathbf{e}^{i_s} \\
 &\quad (\omega^1, \dots, \omega^{\mu-1}, \omega^{\mu+1}, \dots, \omega^r, \mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_{\nu-1}, \mathbf{v}_{\nu+1}, \dots, \mathbf{v}_s)
 \end{aligned}$$

注解

张量积是构造更高阶张量的方法, 缩并是将一个高阶张量降阶的方法。其中, $T_{i_1 i_2 \dots i_r}^{j_1 j_2 \dots j_s} \delta_{j_\mu}^{i_\nu}$ 表示将张量分量中, 第 μ 个上标和第 ν 个下标进行缩并。每次缩并会使张量的阶数减少 2。

例 5.8.4 (并矢的缩并). 在例 5.8.3 中, 并矢是一个 $(1, 1)$ 型张量 $T \in (\mathbb{R}^n)_1^1$ 。它只有一种缩并方式, 得到一个 $(0, 0)$ 型张量 (标量):

$$C_1^1(\mathbf{a} \otimes \mathbf{b}^*) = b_i a^j \delta_j^i = b_i a^i = b_j a^j$$

对 $(1, 1)$ 型张量缩并也可以看成是并矢分量矩阵的迹; 可以看成是 \mathbf{a} 与 \mathbf{b} 的内积。

5.8.6 度量张量

定义 5.8.13 (度量张量 Metric Tensor). 设 $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ 是一个 n 维 F -内积空间, $\{\mathbf{e}_i : i = 1, \dots, n\}$ 是协变基, V^* 是 V 的对偶空间, $\{\mathbf{e}^j : j = 1, \dots, n\}$ 是逆变基。任意协变基用逆变基线性表出:

$$\mathbf{e}_i = g_{ij} \mathbf{e}^j$$

其中,

$$g_{ij} = \mathbf{e}_i(\mathbf{e}_j) = \langle \mathbf{e}_i, \mathbf{e}_j \rangle$$

同理, 任意逆变基也可以用协变基线性表出:

$$\mathbf{e}^j = g^{ij} \mathbf{e}_i$$

其中,

$$g^{ij} = \mathbf{e}^i(\mathbf{e}^j) = \langle \mathbf{e}^i, \mathbf{e}^j \rangle$$

称二阶张量

$$g^{ij} \mathbf{e}_i \otimes \mathbf{e}_j, \quad g_{ij} \mathbf{e}^i \otimes \mathbf{e}^j$$

为 V 上的逆变度量张量和协变度量张量。

定义 5.8.14 (格拉姆矩阵 Gram Matrix). 设 $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ 是一个 n 维 F -内积空间, 向量组 $\{\mathbf{u}_i \in V : i = 1, 2, \dots, n\}$ 的格拉姆矩阵定义为:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \langle \mathbf{u}_1, \mathbf{u}_1 \rangle & \langle \mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2 \rangle & \cdots & \langle \mathbf{u}_1, \mathbf{u}_n \rangle \\ \langle \mathbf{u}_2, \mathbf{u}_1 \rangle & \langle \mathbf{u}_2, \mathbf{u}_2 \rangle & \cdots & \langle \mathbf{u}_2, \mathbf{u}_n \rangle \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \langle \mathbf{u}_n, \mathbf{u}_1 \rangle & \langle \mathbf{u}_n, \mathbf{u}_2 \rangle & \cdots & \langle \mathbf{u}_n, \mathbf{u}_n \rangle \end{bmatrix}$$

命题 5.8.4. 格拉姆矩阵的行列式 $\det(\mathbf{G}) \neq 0$ 当且仅当 $\{\mathbf{u}_i : i = 1, 2, \dots, n\}$ 线性无关。

注解

在内积空间中, 逆变度量张量就是协变基的格拉姆矩阵, 协变度量张量就是逆变基的格拉姆矩阵。协变基和逆变基都是线性无关的向量组, 因此协变格拉姆矩阵和逆变格拉姆矩阵均可逆, 且

$$[g_{ij}] = [g^{ij}]^{-1}$$

如果 $\{\mathbf{e}_i\}$ 是 V 的标准正交基, 度量张量是一个单位矩阵

$$g_{ij} = g^{ij} = \delta_{ij}$$

例 5.8.5 (指标升降). : 设 $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ 是一个 n 维 F -内积空间, $\{\mathbf{e}_i : i = 1, \dots, n\}$ 是协变基, V^* 是 V 的对偶空间, $\{\mathbf{e}^j : j = 1, \dots, n\}$ 是逆变基。任意 $\mathbf{v} \in V$ 用协变基线性表出:

$$\mathbf{v} = v^i \mathbf{e}_i = v^i g_{ij} \mathbf{e}^j = v_j \mathbf{e}^j$$

同理, 用逆变基线性表出:

$$\mathbf{v} = v_j \mathbf{e}^j = v_j g^{ij} \mathbf{e}_i = v^i \mathbf{e}_i$$

度量张量可以看成是一个协变基与逆变基之间的坐标变换矩阵。任意张量 $T \in V_s^r$ 用分量表示为:

$$T = T_{i_1 i_2 \dots i_r}^{j_1 j_2 \dots j_s} \mathbf{e}_{j_1} \otimes \cdots \otimes \mathbf{e}_{j_r} \otimes \mathbf{e}^{i_1} \otimes \cdots \otimes \mathbf{e}^{i_s}$$

其中, 任意协变基向量与逆变基向量之间的关系为:

$$\mathbf{e}_{j_n} = g_{j_n i_m} \mathbf{e}^{i_m}, \quad \mathbf{e}^{i_m} = g^{i_m j_n} \mathbf{e}_{j_n}, \quad n = 1, \dots, r, \quad m = 1, \dots, s$$

因此, 张量的指标可以通过度量张量进行升降, 将 $\mathbf{e}_{j_1} = g_{j_1 i_m} \mathbf{e}^{i_m}$ 代入张量 T 中, 得到一个 $(r+1, s-1)$ 型张量:

$$\begin{aligned} T' &= T_{i_1 i_2 \dots i_r}^{j_1 j_2 \dots j_s} g_{j_1 i_m} \mathbf{e}^{i_m} \otimes \cdots \otimes \mathbf{e}_{j_r} \otimes \mathbf{e}^{i_1} \otimes \cdots \otimes \mathbf{e}^{i_s} \\ &= T_{i_1 i_2 \dots i_r i_m}^{j_2 \dots j_s} \mathbf{e}_{j_2} \otimes \cdots \otimes \mathbf{e}_{j_r} \otimes \mathbf{e}^{i_1} \otimes \cdots \otimes \mathbf{e}^{i_s} \otimes \mathbf{e}^{i_m} \end{aligned}$$

例 5.8.6 (计算内积与范数). 设 $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ 是一个 n 维 \mathbb{C} -内积空间, $\{\mathbf{e}_i : i = 1, \dots, n\}$ 是协变基, V^* 是 V 的对偶空间, $\{\mathbf{e}^j : j = 1, \dots, n\}$ 是逆变基. $\forall \mathbf{u}, \mathbf{v} \in V$ 的内积为:

$$\begin{aligned}\langle \mathbf{u}, \mathbf{v} \rangle &= \langle u^i \mathbf{e}_i, v^j \mathbf{e}_j \rangle = u^i \langle \mathbf{e}_i, \mathbf{e}_j \rangle \overline{v^j} \\ &= u^i g_{ij} \overline{v^j} = u_j \overline{v^j}\end{aligned}$$

2-范数为:

$$\|\mathbf{u}\|_2 = \sqrt{\langle \mathbf{u}, \mathbf{u} \rangle} = \sqrt{u^i g_{ij} \overline{u^j}} = \sqrt{u_j \overline{u^j}}$$

特别地, 当 $\{\mathbf{e}_i\}$ 是 V 的标准正交基时, 度量张量是单位矩阵, 内积和范数的运算简化为欧氏空间或酉空间 5.1.13 中的内积和范数运算。

注解

内积空间的度量张量可用于内积和范数的计算。内积空间的内积运算也可以看成是一个对称、正定的 $(0, 2)$ 型张量: $g_{ij} \mathbf{e}^i \otimes \mathbf{e}^j$ 。在微分几何中, 度量张量就像“尺子”, 用来测量空间中向量的长度和角度。

5.8.7 外形式与外积

定义 5.8.15 (外形式 Exterior Form). 设 V 是一个 n 维 F -线性空间, V^* 是 V 的对偶空间。如果一个 $(0, s)$ 型张量 $T \in V_s^0$ 称为 V 上的一个**外形式**, 当且仅当, $\forall \mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_s \in V$ 和 $\forall i, j = 1, \dots, s$ 都有:

$$T(\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_i, \dots, \mathbf{v}_j, \dots, \mathbf{v}_s) = -T(\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_j, \dots, \mathbf{v}_i, \dots, \mathbf{v}_s)$$

也即交换任意两个下槽的输入, 张量值变号。 V_s^0 中所有的外形式构成一个线性子空间, 记为 $\bigwedge^s(V)$ 。

例 5.8.7 (行列式是一个 n -次外形式). 方阵的行列式是一个 n -次外形式。设 $\mathbf{A} \in F^{n \times n}$, 将它的行向量 (或列向量) 看作 F^n 中的 n 个向量 $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_n \in F^n$, 则行列式 $\det(\mathbf{A})$ 可以看作 $(F^n)_n^0$ 型张量:

$$\det(\mathbf{A}) = \det(\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_n)$$

并且, 根据命题 5.3.11, 交换任意两行 (或两列), 行列式的值变号, 所以行列式是一个 n -次外形式。

注解

外形式是张量的一种特殊类型, 具有反对称性。标量可以看成是 0 次外形式, 对偶空间中的线性泛函 $\mathbf{v}^* \in V^*$ 可以看成是 1 次外形式。

定义 5.8.16 (反对称化运算). 任何一个 $(0, r)$ 型张量 $T \in V_r^0$ 都可以通过反对称化运算 $A_r : V_r^0 \rightarrow \bigwedge^r V^*$, 得到一个 r -次外形式。

$$\begin{aligned}(A_r(T))(\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_r) &= \frac{1}{r!} \sum_{\sigma \in S_r} (\text{sgn}(\sigma) T(\mathbf{v}_{\sigma(1)}, \dots, \mathbf{v}_{\sigma(r)})) \\ &= \frac{1}{r!} \delta_{12 \dots n}^{j_1 j_2 \dots j_n} T(\mathbf{v}_{j_1}, \dots, \mathbf{v}_{j_r})\end{aligned}$$

其中, S_r 是 $1, 2, \dots, r$ 的全排列集合, $\text{sgn}(\sigma)$ 是排列 σ 的符号, $\delta_{12\dots n}^{j_1 j_2 \dots j_n}$ 是广义克罗内克尔符号。

例 5.8.8. 设 $T \in V_2^0$, 反对称化得到一个新的 2 阶协变张量 $A_2(T)$ 为:

$$A_2(T)(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = \frac{1}{2}(T(\mathbf{u}, \mathbf{v}) - T(\mathbf{v}, \mathbf{u}))$$

因为, $A_2(T)(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = -A_2(T)(\mathbf{v}, \mathbf{u})$, 则 $A_2(T) \in \bigwedge^2 V$ 是一个 2-次外形式。

注解

反对称化运算是将一个普通的协变张量转换为外形式的过程。反对称化运算类似于行列式展开的定义 5.7.2。

定义 5.8.17 (外积 Exterior Product). 设 V 是 F -线性空间, 设函数 $\wedge: \bigwedge^r V \times \bigwedge^s V \rightarrow \bigwedge^{r+s} V$ 称为外积, 那么任意 $f \in \bigwedge^r V$, $g \in \bigwedge^s V$ 的外积记为 $f \wedge g \in \bigwedge^{r+s} V$ 有:

$$f \wedge g := \frac{(r+s)!}{r!s!} A_{r+s}[(f \otimes g)]$$

其中, $f \otimes g \in V_{r+s}^0$ 是 f, g 的张量积, A_{r+s} 是反对称化运算。外积也称为**楔积 Wedge Product**。

命题 5.8.5 (外积运算的性质). 设 $f \in \bigwedge^r V$, $g \in \bigwedge^s V$, $h \in \bigwedge^t V$, 则外积运算具有以下性质:

1. 反交换律: $f \wedge g = (-1)^{rs} g \wedge f$
2. 结合律: $(f \wedge g) \wedge h = f \wedge (g \wedge h)$
3. 分配律: $f \wedge (g + h) = f \wedge g + f \wedge h$

命题 5.8.6 (外形式的基底). 设 V 是一个 n 维 F -线性空间, $\{\mathbf{e}_i : i = 1, \dots, n\}$ 是协变基, V^* 是 V 的对偶空间, $\{\mathbf{e}^j : j = 1, \dots, n\}$ 是逆变基。那么 $\bigwedge^r V$ 的一个基底为:

$$\{e^{i_1} \wedge e^{i_2} \wedge \dots \wedge e^{i_r} : 1 \leq i_1 < i_2 < \dots < i_r \leq n\}$$

其中, $1 \leq i_1 < i_2 < \dots < i_r \leq n$ 表示从 n 个元素中取 r 个元素的所有组合。 $\bigwedge^r V$ 的维数为 $\dim \bigwedge^r V = C(n, r) = \binom{n}{r} = \frac{n!}{r!(n-r)!}$ 。

例 5.8.9 (三维欧氏空间的向量外积). 在 \mathbb{R}^3 中, 设 $\{\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3\}$ 是标准正交基, $\{\mathbf{e}^1, \mathbf{e}^2, \mathbf{e}^3\}$ 是其对偶基。 $\bigwedge^2(\mathbb{R}^3)$ 的维数为 $C(3, 2) = 3$, $\bigwedge^2(\mathbb{R}^3)$ 的基底为:

$$\begin{aligned} \mathbf{e}^1 \wedge \mathbf{e}^2 &= \mathbf{e}^1 \otimes \mathbf{e}^2 - \mathbf{e}^2 \otimes \mathbf{e}^1 \\ \mathbf{e}^2 \wedge \mathbf{e}^3 &= \mathbf{e}^2 \otimes \mathbf{e}^3 - \mathbf{e}^3 \otimes \mathbf{e}^2 \\ \mathbf{e}^3 \wedge \mathbf{e}^1 &= \mathbf{e}^3 \otimes \mathbf{e}^1 - \mathbf{e}^1 \otimes \mathbf{e}^3 \end{aligned}$$

设 $\mathbf{u} = u_i \mathbf{e}^i, \mathbf{v} = v_j \mathbf{e}^j \in \mathbb{R}^3 = \bigwedge^1(\mathbb{R}^3)$, 则 $\mathbf{u} \wedge \mathbf{v} \in \bigwedge^2(\mathbb{R}^3)$ 可以表示为:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{u} \wedge \mathbf{v} &= (u_i \mathbf{e}^i) \wedge (v_j \mathbf{e}^j) \\
 &= 2A_2(u_i v_j \mathbf{e}^i \otimes \mathbf{e}^j) \\
 &= u_i v_j (\mathbf{e}^i \otimes \mathbf{e}^j - \mathbf{e}^j \otimes \mathbf{e}^i) \\
 &= (u_1 v_2 - u_2 v_1) \mathbf{e}^1 \wedge \mathbf{e}^2 + (u_2 v_3 - u_3 v_2) \mathbf{e}^2 \wedge \mathbf{e}^3 + (u_3 v_1 - u_1 v_3) \mathbf{e}^3 \wedge \mathbf{e}^1 \\
 &= \begin{vmatrix} u_1 & u_2 \\ v_1 & v_2 \end{vmatrix} \mathbf{e}^1 \wedge \mathbf{e}^2 + \begin{vmatrix} u_2 & u_3 \\ v_2 & v_3 \end{vmatrix} \mathbf{e}^2 \wedge \mathbf{e}^3 + \begin{vmatrix} u_3 & u_1 \\ v_3 & v_1 \end{vmatrix} \mathbf{e}^3 \wedge \mathbf{e}^1
 \end{aligned}$$

在四元数乘法的定义 3.5.4 中, 首次引入了两个向量的叉乘:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{u} \times \mathbf{v} &= \begin{vmatrix} \mathbf{e}^1 & \mathbf{e}^2 & \mathbf{e}^3 \\ u_1 & u_2 & u_3 \\ v_1 & v_2 & v_3 \end{vmatrix} \\
 &= \begin{vmatrix} u_2 & u_3 \\ v_2 & v_3 \end{vmatrix} \mathbf{e}^1 - \begin{vmatrix} u_1 & u_3 \\ v_1 & v_3 \end{vmatrix} \mathbf{e}^2 + \begin{vmatrix} u_1 & u_2 \\ v_1 & v_2 \end{vmatrix} \mathbf{e}^3 \\
 &= (u_2 v_3 - u_3 v_2) \mathbf{e}^1 - (u_1 v_3 - u_3 v_1) \mathbf{e}^2 + (u_1 v_2 - u_2 v_1) \mathbf{e}^3
 \end{aligned}$$

通过对比发现, $\mathbf{u} \wedge \mathbf{v}$ 与 $\mathbf{u} \times \mathbf{v}$ 存在某种联系, 称为 **Hodge 对偶** (见下文)。

注解

张量积和反对称化运算相结合得到外积运算。外积用于构造更高阶的外形式, 例如面积元素、体积元素等。外形式空间的维数由组合数决定, 这反映了从 n 个基向量中选择 r 个进行外积的不同方式。

定义 5.8.18 (Hodge 对偶 Hodge Dual). 在 \mathbb{R}^n 中, $\{\mathbf{e}_i : i = 1, \dots, n\}$ 是标准正交基, $\{\mathbf{e}^j : j = 1, \dots, n\}$ 是其对偶基。设

$$\text{vol} = \mathbf{e}^1 \wedge \mathbf{e}^2 \wedge \dots \wedge \mathbf{e}^n \in \bigwedge^n(\mathbb{R}^n)$$

称为**体积元素 Volume Element**。设线性映射 $*$: $\bigwedge^r(\mathbb{R}^n) \rightarrow \bigwedge^{n-r}(\mathbb{R}^n)$ 称为 **Hodge 对偶**, 当且仅当, 满足:

$$\forall \alpha, \beta \in \bigwedge^r(\mathbb{R}^n), * \beta \in \bigwedge^{n-r}(\mathbb{R}^n), \quad \alpha \wedge (*\beta) = \langle \alpha, \beta \rangle \text{vol}$$

特别地:

$$*\text{vol} = 1, \quad *1 = \text{vol}$$

注解

Hodge 对偶将一个 r -次外形式映射为一个 $(n-r)$ -次外形式。在三维欧氏空间中, 2-次外形式与 1-次外形式之间的 Hodge 对偶对应于向量的叉积运算。

例 5.8.10 (三维欧氏空间的向量叉积). 在 \mathbb{R}^3 中, 设 $\{\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3\}$ 是标准正交基, $\{\mathbf{e}^1, \mathbf{e}^2, \mathbf{e}^3\}$ 是其

对偶基。

$$*(\mathbf{e}^1 \wedge \mathbf{e}^2) = \mathbf{e}^3$$

$$*(\mathbf{e}^2 \wedge \mathbf{e}^3) = \mathbf{e}^1$$

$$*(\mathbf{e}^3 \wedge \mathbf{e}^1) = \mathbf{e}^2$$

那么, 根据例子 5.8.9 两向量的叉乘定义为:

$$\mathbf{u} \times \mathbf{v} := *(\mathbf{u} \wedge \mathbf{v}) \in \bigwedge^{3-2}(\mathbb{R}^3) = \mathbb{R}^3$$

在 \mathbb{R}^3 中, $\mathbf{u} \times \mathbf{v}$:

$$\|\mathbf{u} \times \mathbf{v}\|_2 = \|\mathbf{u}\|_2 \|\mathbf{v}\|_2 \sin \theta$$

其中, $\theta = \angle(\mathbf{u}, \mathbf{v})$ 是两向量的夹角, 那么 $\mathbf{u} \times \mathbf{v}$ 的大小表示平行四边形的面积; 方向表示平行四边形的法向。而 $\mathbf{u} \wedge \mathbf{v} \in \bigwedge^2(\mathbb{R}^3)$ 就表示该平行四边形本身。

例 5.8.11 (向量的混合积与矩阵行列式的几何意义). 设 $\mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{w} \in \mathbb{R}^3$, 它们的混合积可以表示定义为:

$$[\mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{w}] := \mathbf{u} \cdot (\mathbf{v} \times \mathbf{w})$$

在标准正交基下, $\mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{w}$ 分别表示为:

$$\mathbf{u} = u_i \mathbf{e}^i, \quad \mathbf{v} = v_j \mathbf{e}^j, \quad \mathbf{w} = w_k \mathbf{e}^k$$

根据例 5.8.10, 混合积可以表示为:

$$\begin{aligned} [\mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{w}] &= \mathbf{u} \cdot (\mathbf{v} \times \mathbf{w}) \\ &= u_i \mathbf{e}^i \cdot *((v_j \mathbf{e}^j) \wedge (w_k \mathbf{e}^k)) \\ &= u_i v_j w_k (\mathbf{e}^i \cdot *(\mathbf{e}^j \wedge \mathbf{e}^k)) \\ &= u_i v_j w_k (\delta_{123}^{ijk}) \\ &= u_1 v_2 w_3 + u_2 v_3 w_1 + u_3 v_1 w_2 - u_3 v_2 w_1 - u_1 v_3 w_2 - u_2 v_1 w_3 \\ &= \begin{vmatrix} u_1 & u_2 & u_3 \\ v_1 & v_2 & v_3 \\ w_1 & w_2 & w_3 \end{vmatrix} \end{aligned}$$

在由 $\mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{w}$ 这三个向量所构成的平行六面体中, $\mathbf{v} \times \mathbf{w}$ 的大小表示底面的面积, 方向表示底面的法向, $\mathbf{u} \cdot (\mathbf{v} \times \mathbf{w})$ 就表示该平行六面体的体积。该体积也就是行列式的几何意义, 表示线性变换对空间的拉伸因子。

5.9 解析几何

5.9.1 直线与平面

5.10 射影几何

5.10.1 平行投影与中心投影

5.10.2 射影平面

Chapter 6

点集拓扑

6.1 拓扑空间的定义

6.1.1 开集与闭集

定义 6.1.1 (拓扑空间 Topological Space). 设 X 是一个集合, $\mathcal{T}(X) \subseteq \mathcal{P}(X)$ 是 X 的子集族, 二元组 (X, \mathcal{T}) 称为**拓扑空间**, 当且仅当, \mathcal{T} 满足:

1. 空集与全集: $\emptyset \in \mathcal{T}$ 且 $X \in \mathcal{T}$;
2. 对任意并封闭: 任意 $\{U_i : i \in I\} \subseteq \mathcal{T}$, 有 $\bigcup_{i \in I} U_i \in \mathcal{T}$;
3. 对有限交封闭: 有限个 $U_1, U_2, \dots, U_n \in \mathcal{T}$, 有 $U_1 \cap U_2 \cap \dots \cap U_n \in \mathcal{T}$.

子集族 \mathcal{T} 称为 X 上的**拓扑 Topology**, \mathcal{T} 中的元素称为**开集 Open Set**.

注解

根据拓扑空间的定义, 幂集 $\mathcal{P}(X)$ 和 $\{\emptyset, X\}$ 都是 X 上的拓扑, 分别称为**离散拓扑 Discrete Topology**和**平凡拓扑 Trivial Topology**. 给定集合 X , X 的任意子集族并非都是 X 上的拓扑, X 的拓扑也非唯一. 比如, 设 $X = \{a, b, c\}$, 那么下面的子集族都是 X 上的拓扑:

$$\begin{aligned}\mathcal{T}_1(X) &= \{\emptyset, X\}, \\ \mathcal{T}_2(X) &= \mathcal{P}(X), \\ \mathcal{T}_3(X) &= \{\emptyset, X, \{a\}\}, \\ \mathcal{T}_4(X) &= \{\emptyset, X, \{a, b\}\}, \\ \mathcal{T}_5(X) &= \{\emptyset, X, \{a\}, \{a, b\}\}, \\ \mathcal{T}_6(X) &= \{\emptyset, X, \{a, b\}, \{b\}, \{b, c\}\}.\end{aligned}$$

下面的子集族不是 X 上的拓扑:

$$\begin{aligned}\mathcal{T}_7(X) &= \{\emptyset, X, \{a\}, \{b\}\}, \\ \mathcal{T}_8(X) &= \{\emptyset, X, \{a, b\}, \{b, c\}\}.\end{aligned}$$

定义 6.1.2 (闭集 Closed Set). 设 (X, \mathcal{T}) 是拓扑空间, X 的子集 $A \subseteq X$ 称为**闭集**, 当且仅当 $\mathbb{C}_X A \in \mathcal{T}$.

命题 6.1.1 (闭集的性质). 设 $(X, \mathcal{T}(X))$ 为拓扑空间, 则有:

1. 空集与全集: \emptyset 与 X 是闭集;
2. 对任意交封闭: $\bigcap_{i \in I} A_i$ 是闭集, 其中 $\{A_i : i \in I\}$ 是闭集;
3. 对有限并封闭: $A_1 \cup A_2 \cup \cdots \cup A_n$ 是闭集, 其中 A_1, A_2, \dots, A_n 是闭集。

例 6.1.1 (实数集的拓扑). 设 $(\mathbb{R}, \mathcal{T})$, 则实数集上的拓扑为:

$$\mathcal{T}(\mathbb{R}) = \{U \subseteq \mathbb{R} : U \text{ 是开区间的任意并集}\} \cup \{\emptyset, \mathbb{R}\}.$$

其中,

1. 任意开区间 (a, b) 是开集; $(a, +\infty)$ 和 $(-\infty, b)$ 也是开集;
2. 任意闭区间 $[a, b]$ 是闭集, 它是开区间 $(-\infty, b) \cap (a, +\infty)$ 的补集;
3. 有限集是闭集, 比如 $\{a\}$ 是闭集, 因为它是开集 $(-\infty, a) \cap (a, +\infty)$ 的补集;
4. \mathbb{R} 和 \emptyset 既是开集也是闭集
5. 任意半开半闭区间 $[a, b)$ 和 $(a, b]$ 既不是开集也不是闭集。

注解

在拓扑空间, 开集的补集就是闭集, 闭集的补集是开集。开集是对几何空间中开区间、开球等概念的抽象; 闭集是对几何空间中闭区间、闭球等概念的抽象。空集和全集既是开集又是闭集, 当然也存在既非开集也非闭集的集合。

6.1.2 领域和聚点

定义 6.1.3 (领域 Neighborhood). 设 (X, \mathcal{T}) 是拓扑空间, $x \in X$ 的**领域**记为 $N(x) \subseteq X$, 定义为: 存在开集 $U \in \mathcal{T}$, 使得:

$$x \in U \subseteq N(x) \subseteq X$$

领域 $N(x)$ 不一定是开集。如果 $N(x) \in \mathcal{T}$ 是开集, 则称为**开领域**。

例 6.1.2. 在 $(\mathbb{R}, \mathcal{T})$ 中, 设 $x = 0$, 则

1. $N_1(0) = (-1, 1)$ 是 0 的开领域, 因为 $(-1, 1)$ 是开集, 且 $0 \in (-0.5, 0.5) \subseteq (-1, 1)$;
2. $N_2(0) = [-1, 1]$ 是 0 的领域, 因为存在开集 $(-0.5, 0.5)$, 使得 $0 \in (-0.5, 0.5) \subseteq [-1, 1]$, 但 $[-1, 1]$ 不是开集, 所以不是开领域;
3. $N_3(0) = \{0\} \cup (1, 2)$ 不是 0 的领域, 因为不存在开集 U , 使得 $0 \in U \subseteq \{0\} \cup (1, 2)$ 。

注解

领域就是拓扑空间中对点“附近”的一种抽象描述。

定义 6.1.4 (聚点 Accumulation Point). 设 (X, \mathcal{T}) 是拓扑空间, $A \subseteq X$, 点 $x \in X$ 称为 A 的聚点, 当且仅当, x 的每个领域 $N(x)$ 都与 A 有交集, 且

$$N(x) \cap (A \setminus \{x\}) \neq \emptyset.$$

例 6.1.3. 在 $(\mathbb{R}, \mathcal{T})$ 中, 设 $A = \{1/n : n \in \mathbb{Z}^+\}$, 则

1. 0 是 A 的聚点, 因为 0 的每个领域都与 A 有交集;
2. 1 不是 A 的聚点, 因为存在开领域 $(0.5, 1.5)$, 使得 $(0.5, 1.5) \cap (A \setminus \{1\}) = \emptyset$;
3. $1/2$ 不是 A 的聚点, 因为存在开领域 $(0.4, 0.6)$, 使得 $(0.4, 0.6) \cap (A \setminus \{1/2\}) = \emptyset$.

在实数集中, 柯西序列的极限都是聚点。

注解

x 是 A 的聚点, 并不需要 $x \in A$, 只需要 x 的每个领域与 $A \setminus \{x\}$ 有交集即可。比如, 在例 3.3.1 中, 设 $A = \{x \in \mathbb{Q} : x = 1, 1.4, 1.41, 1.414, 1.4142, \dots\}$ 是一个有理柯西序列, $\sqrt{2}$ 是 A 的聚点, 但 $\sqrt{2} \notin A$ 。

命题 6.1.2 (闭集判定的充要条件). 设 (X, \mathcal{T}) 是拓扑空间, $A \subseteq X$, 则 A 是闭集当且仅当 A 的每个聚点都属于 A 。

证明. 必要性: 设 A 是闭集, x 是 A 的聚点, 若 $x \notin A$, 则 $x \in \mathbb{C}_X A$ 。因为 A 是闭集, 所以 $\mathbb{C}_X A$ 是开集, 因此, 存在开集 $U \in \mathcal{T}$, 使得

$$x \in U \subseteq \mathbb{C}_X A.$$

这就说明 U 与 $A \setminus \{x\}$ 没有交集, 这与 x 是 A 的聚点矛盾, 所以 $x \in A$ 。

充分性: 设 A 的每个聚点都属于 A , 若 A 不是闭集, 则 $\mathbb{C}_X A$ 不是开集, 所以存在点 $x \in \mathbb{C}_X A$, 使得对任意开集 $U \in \mathcal{T}$, 只要 $x \in U$, 就有

$$U \cap A \neq \emptyset.$$

这就说明 x 的每个领域都与 $A \setminus \{x\}$ 有交集, 所以 x 是 A 的聚点, 由假设可知, $x \in A$, 这与 $x \in \mathbb{C}_X A$ 矛盾, 所以 A 是闭集。□

6.1.3 集合的内部与闭包

定义 6.1.5 (集合的内部与闭包). 设 (X, \mathcal{T}) 是拓扑空间, $A \subseteq X$, A 的内部记为 $\text{int}(A)$, 定义为:

$$\text{int}(A) = \bigcup \{U \in \mathcal{T} : U \subseteq A\}$$

也即 A 的内部是所有包含于 A 的开集的并。

命题 6.1.3. 设 (X, \mathcal{T}) 是拓扑空间, $A \subseteq X$, 则 $\text{int}(A)$ 是包含于 A 的最大开集。

定义 6.1.6 (集合的闭包 Closure). 设 (X, \mathcal{T}) 是拓扑空间, $A \subseteq X$, A 的闭包记为 $\text{cl}(A)$ 或 \overline{A} , 定义为:

$$\text{cl}(A) = \bigcap \{F \subseteq X : F \text{ 是闭集且 } A \subseteq F\}$$

也即 A 的闭包是所有包含 A 的闭集的交。

命题 6.1.4. 设 (X, \mathcal{T}) 是拓扑空间, $A \subseteq X$, 则 $\text{cl}(A)$ 是包含 A 的最小闭集。

命题 6.1.5 (开集和闭集判定的充要条件). 设 (X, \mathcal{T}) 是拓扑空间, $A \subseteq X$, 则

1. A 是开集当且仅当 $\text{int}(A) = A$;
2. A 是闭集当且仅当 $\text{cl}(A) = A$ 。

命题 6.1.6 (集合内部与闭包的关系). 设 (X, \mathcal{T}) 是拓扑空间, $A \subseteq X$, 则

$$\text{cl}(A) = A \cup \{A \text{ 的所有聚点}\}.$$

证明. 设 $F = A \cup \{A \text{ 的所有聚点}\}$, 则 $A \subseteq F$. 若 $x \in F$ 的补集 $\mathbb{C}_X F$, 则 $x \notin A$ 且 x 不是 A 的聚点, 所以存在开集 $U \in \mathcal{T}$, 使得

$$x \in U \subseteq \mathbb{C}_X A.$$

这就说明 $\mathbb{C}_X F$ 是开集, 所以 F 是闭集, 因此, $\text{cl}(A) \subseteq F$. 若 $F \not\subseteq \text{cl}(A)$, 则存在 $x \in F$, 使得 $x \notin \text{cl}(A)$, 所以 $x \in \mathbb{C}_X \text{cl}(A)$. 因为 $\text{cl}(A)$ 是闭集, 所以 $\mathbb{C}_X \text{cl}(A)$ 是开集, 因此, 存在开集 $V \in \mathcal{T}$, 使得

$$x \in V \subseteq \mathbb{C}_X \text{cl}(A).$$

这就说明 V 与 $A \setminus \{x\}$ 没有交集, 所以 x 不是 A 的聚点, 由假设可知, $x \in A$, 这与 $x \notin \text{cl}(A)$ 矛盾, 所以 $F \subseteq \text{cl}(A)$. 综上所述, $\text{cl}(A) = F = A \cup \{A \text{ 的所有聚点}\}$. \square

例 6.1.4. 在 $(\mathbb{R}, \mathcal{T})$ 中, 设 $A = (1, 2]$, 则

1. A 的内部为 $\text{int}(A) = (1, 2)$, 它是包含于 A 的最大开集;
2. A 的闭包为 $\text{cl}(A) = (1, 2) \cup \{1, 2\} = [1, 2]$, 它是包含 A 的最小闭集。

注解

集合内部中的点称为集合的**内点**, 根据命题 6.1.5 可知, 开集中的点都是内点。

6.1.4 集合的边界与外部

定义 6.1.7 (集合的边界 Boundary). 设 (X, \mathcal{T}) 是拓扑空间, $A \subseteq X$, A 的边界记为 ∂A , 定义为:

$$\partial A = \text{cl}(A) \setminus \text{int}(A)$$

命题 6.1.7 (闭包分解). 设 (X, \mathcal{T}) 是拓扑空间, $A \subseteq X$, 则 $\text{cl}(A) = \text{int}(A) \cup \partial(A) = A \cup \partial(A)$ 。

证明. 因为 $\text{int}(A) \subseteq A \subseteq \text{cl}(A)$, 所以只需证明 $\text{cl}(A) = \text{int}(A) \cup \partial(A)$ 。根据定义, $\partial A = \text{cl}(A) \setminus \text{int}(A) = \mathbb{C}_{\text{cl}(A)} \text{int}(A)$, 所以,

$$\text{int}(A) \cup \partial(A) = \text{int}(A) \cup (\mathbb{C}_{\text{cl}(A)} \text{int}(A)) = \text{cl}(A)$$

□

定义 6.1.8 (集合的外部 Exterior). 设 (X, \mathcal{T}) 是拓扑空间, $A \subseteq X$, A 的外部记为 $\text{ext}(A)$, 定义为:

$$\text{ext}(A) = \mathbb{C}_X \text{cl}(A).$$

命题 6.1.8 (集合的外部是开集). 设 (X, \mathcal{T}) 是拓扑空间, $A \subseteq X$, 则 $\text{ext}(A)$ 是开集, 并且

$$\text{ext}(A) = \mathbb{C}_X \text{cl}(A) = \text{int}(\mathbb{C}_X A)$$

证明. 因为 $\text{cl}(A)$ 是闭集, 所以 $\mathbb{C}_X \text{cl}(A)$ 是开集, 因此, $\text{ext}(A)$ 是开集。根据集合外部的定义, $\text{ext}(A) = \mathbb{C}_X \text{cl}(A) = \{x \in X : x \notin A \text{ 并且 } x \notin \{A \text{ 的所有聚点}\}\}$ 。因为 $\forall x \in \text{int}(\mathbb{C}_X A) \subseteq \mathbb{C}_X A$, 所以 $x \notin A$; 又因为, $\forall x \in \text{int}(\mathbb{C}_X A)$, 存在 $x \in U \subseteq \mathbb{C}_X A$, 根据集合的矛盾律 1.2.3 $\mathbb{C}_X A \cap A = \emptyset$ 所以 $U \cap A = \emptyset$, 说明 x 不是 A 的聚点。那么 $\forall x \in \text{int}(\mathbb{C}_X A)$, $x \in \{x \in X : x \notin A \text{ 并且 } x \notin \{A \text{ 的所有聚点}\}\} = \mathbb{C}_X \text{cl}(A)$, □

命题 6.1.9. 设 (X, \mathcal{T}) 是拓扑空间, $A \subseteq X$, 则

$$X = \text{int}(A) \cup \partial(A) \cup \text{ext}(A)$$

并且,

$$\text{int}(A) \cap \partial(A) = \emptyset,$$

$$\text{int}(A) \cap \text{ext}(A) = \emptyset,$$

$$\partial(A) \cap \text{ext}(A) = \emptyset$$

证明. 根据边界 6.1.7 和外部 6.1.8 的定义, 以及命题 6.1.7 和 6.1.8 可以非常容易证明。 □

注解

集合的内部, 边界和外部, 将全集划分为三个互不相交的部分。

例 6.1.5. 在 $(\mathbb{R}, \mathcal{T})$ 中, 设 $A = (1, 2]$, 则

1. A 的边界为 $\partial A = [1, 2] \setminus (1, 2) = \{1, 2\}$;
2. A 的外部为 $\text{ext}(A) = (-\infty, +\infty) \setminus [1, 2] = (-\infty, 1) \cup (2, +\infty)$ 。

命题 6.1.10. 设 (X, \mathcal{T}) 是拓扑空间, $A \subseteq X$, 则有:

$$\mathbb{C}_X(\text{int}(A)) = \text{cl}(\mathbb{C}_X A)$$

证明. 根据内部 6.1.5 的定义, $\text{int}(A) = \bigcup\{U \in \mathcal{T} : U \subseteq A\}$ 。根据德摩根律 1.2.3 有:

$$\mathbb{C}_X(\text{int}(A)) = \mathbb{C}_X\left(\bigcup\{U \in \mathcal{T} : U \subseteq A\}\right) = \bigcap\{\mathbb{C}_X U : U \in \mathcal{T} \text{ 且 } U \subseteq A\}.$$

因为 U 是开集, 所以 $\mathbb{C}_X U$ 是闭集, 并且 $A \subseteq U$ 等价于 $\mathbb{C}_X U \subseteq \mathbb{C}_X A$, 根据闭包 6.1.6 的定义, 有:

$$\mathbb{C}_X(\text{int}(A)) = \bigcap\{\mathbb{C}_X U : U \in \mathcal{T} \text{ 且 } A \subseteq U\} = \text{cl}(\mathbb{C}_X A).$$

□

推论 6.1.1. 设 (X, \mathcal{T}) 是拓扑空间, $A \subseteq X$, 则。

1. 集合的边界等于补集的边界: $\partial A = \partial(\mathbb{C}_X A)$
2. 集合的边界等于闭包与补集闭包的交: $\partial A = \text{cl}(A) \cap \text{cl}(\mathbb{C}_X A)$;

证明. 推论 1: 根据命题 6.1.9 有:

$$\mathbb{C}_X(\text{int}(A)) = \partial(A) \cup \text{ext}(A)$$

根据命题 6.1.7 有:

$$\text{cl}(\mathbb{C}_X A) = \partial(\mathbb{C}_X A) \cup \text{int}(\mathbb{C}_X A)$$

根据命题 6.1.10 $\mathbb{C}_X(\text{int}(A)) = \text{cl}(\mathbb{C}_X A)$, 那么:

$$\partial(A) \cup \text{ext}(A) = \partial(\mathbb{C}_X A) \cup \text{int}(\mathbb{C}_X A)$$

根据命题 6.1.8 $\text{ext}(A) = \text{int}(\mathbb{C}_X A)$ 。并且 $\partial A \cap \text{ext}(A) = \emptyset$, $\partial(\mathbb{C}_X A) \cap \text{int}(\mathbb{C}_X A) = \emptyset$, 所以:

$$\partial A = \partial(\mathbb{C}_X A) = \partial(\mathbb{C}_X A)$$

推论 2:

$$\text{cl}(A) \cap \text{cl}(\mathbb{C}_X A) = \text{cl}(A) \cap \mathbb{C}_X \text{int}(A) = \text{cl}(A) \cap [\partial(A) \cup \text{ext}(A)]$$

根据集合交并的分配律 1.2.3 有:

$$\text{cl}(A) \cap [\partial(A) \cup \text{ext}(A)] = [\text{cl}(A) \cap \partial(A)] \cup [\text{cl}(A) \cap \text{ext}(A)]$$

其中, $\text{cl}(A) \cap \partial(A) = \emptyset$, $\text{cl}(A) \cap \partial(A) = \partial A$, 所以:

$$\text{cl}(A) \cap \text{cl}(\mathbb{C}_X A) = [\text{cl}(A) \cap \partial(A)] \cup [\text{cl}(A) \cap \text{ext}(A)] = \partial A$$

□

注解

总结一下, 在拓扑空间 (X, \mathcal{T}) 中, 子集 $A \subseteq X$ 的内部、闭包、边界和外部的关系如下:

1. 内部: $\text{int}(A)$ 是包含于 A 的最大开集;
2. 闭包: $\text{cl}(A)$ 是包含 A 的最小闭集, 并且 $\text{cl}(A) = A \cup \{A \text{ 的所有聚点}\}$;
3. 边界: $\partial A = \text{cl}(A) \setminus \text{int}(A) = \text{cl}(A) \cap \text{cl}(\mathbb{C}_X A) = \partial(\mathbb{C}_X A)$;
4. 外部: $\text{ext}(A) = \mathbb{C}_X \text{cl}(A) = \text{int}(\mathbb{C}_X A)$;
5. 补集: $\mathbb{C}_X(\text{int}(A)) = \text{cl}(\mathbb{C}_X A)$;
6. 分解: $X = \text{int}(A) \cup \partial(A) \cup \text{ext}(A)$, 并且 $\text{int}(A)$ 、 $\partial(A)$ 和 $\text{ext}(A)$ 互不相交。

比如, 在 $(\mathbb{R}, \mathcal{T})$ 中, 设 $A = (1, 2]$, 则

1. A 的补集为 $\mathbb{C}_{\mathbb{R}} A = (-\infty, 1] \cup (2, +\infty)$;
2. A 的内部为 $\text{int}(A) = (1, 2)$;
3. A 的闭包为 $\text{cl}(A) = [1, 2]$;
4. A 的边界为 $\partial A = [1, 2] \setminus (1, 2) = \{1, 2\}$;
5. A 的外部为 $\text{ext}(A) = (-\infty, +\infty) \setminus [1, 2] = (-\infty, 1) \cup (2, +\infty)$ 。

6.1.5 拓扑基

6.1.6 子空间拓扑

6.2 度量空间的定义

定义 6.2.1 (度量空间 Metric Space). 设 X 是一个非空集合, 映射 $d: X \times X \rightarrow \mathbb{R}$ 称为**度量**, 当且仅当, $\forall x, y, z \in X$, 有:

1. 非负性: $d(x, y) \geq 0$, 且当且仅当 $x = y$ 时取等号;
2. 对称性: $d(x, y) = d(y, x)$;
3. 三角不等式: $d(x, z) \leq d(x, y) + d(y, z)$ 。

二元组 (X, d) 称为**度量空间**, 函数 d 称为 X 上的度量。

定义 6.2.2 (开球 Open Ball). 设 (X, d) 为度量空间, $x \in X$ 且 $r > 0$, 集合 $B(x, r) = \{y \in X : d(x, y) < r\}$ 称为以 x 为中心、 r 为半径的**开球**。

命题 6.2.1 (度量空间诱导的拓扑). 设 (X, d) 为度量空间, 定义 $\mathcal{T}(X) = \{U \subseteq X : \forall x \in U, \exists r > 0, B(x, r) \subseteq U\}$, 则 $(X, \mathcal{T}(X))$ 为拓扑空间。

例 6.2.1 (实数集上的开集与闭集). 实数集 \mathbb{R} 和绝对值距离 $d(x, y) = |x - y|$ 构成一个度量空间, 其中,

1. 任意开区间 (a, b) 是开集; $(a, +\infty)$ 和 $(-\infty, b)$ 也是开集;
2. 任意闭区间 $[a, b]$ 是闭集, 它是开区间 $(-\infty, b) \cap (a, +\infty)$ 的补集;
3. 有限集是闭集, 比如 $\{a\}$ 是闭集, 因为它是开集 $(-\infty, a) \cap (a, +\infty)$ 的补集;
4. \mathbb{R} 和 \emptyset 既是开集也是闭集
5. 任意半开半闭区间 $[a, b)$ 和 $(a, b]$ 既不是开集也不是闭集。

6.3 连续函数与同胚

定义 6.3.1 (连续函数 Continuous Function). 设 $(X, \mathcal{T}(X))$ 和 $(Y, \mathcal{T}(Y))$ 是拓扑空间, 映射 $f: X \rightarrow Y$ 称为连续函数, 当且仅当, $\forall V \in \mathcal{T}(Y)$, 有 $f^{-1}(V) \in \mathcal{T}(X)$ 。

定义 6.3.2 (同胚 Homeomorphism). 设 $(X, \mathcal{T}(X))$ 和 $(Y, \mathcal{T}(Y))$ 是拓扑空间, 映射 $f: X \rightarrow Y$ 称为同胚, 当且仅当, f 是双射且 f 与 f^{-1} 都是连续函数, 记为 $X \cong Y$ 。

注解

连续函数是对几何空间中连续变化概念的抽象。连续函数保持了拓扑结构, 即开集的原像仍然是开集。同胚是拓扑空间之间的一种等价关系, 表示两个拓扑空间在拓扑意义下是相同的。拓扑空间的同胚类似于代数结构的同构。