

前 言

线性代数不仅在数学、力学、物理学等经典自然科学及工程技术领域有着重要的应用,而且在经济学、管理学等社会科学领域也有着十分广泛的应用.该课程已成为高等院校各相关专业学生必修的一门重要基础课程.“线性代数”在高等院校高素质人才培养中具有特定的不可替代的作用.线性代数不仅为其他后续的学科和专业基础课、专业课提供有力的数学工具和数学基础,并且对培养学生的理性思维、创新能力、科学精神、治学态度以及用数学知识分析和解决实际问题等方面都具有非常重要的作用.

随着科技水平的不断提高和高等教育的飞速发展,线性代数的教学内容、方式和手段也在不断地与时俱进.《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020年)》以及“十三五”规划纲要(2016—2020年)相继出台后,这一变化更显突出.“到2020年,基本实现教育现代化,基本形成学习型社会,进入人力资源强国行列”并且提出要全面实施“高等学校本科教学质量与改革工程”,我们正是在这一特定形势下编写了本教材.

教材的编写既要体现“夯实基础、拓宽口径、提高素质”人才质量的培养要求,又要使内容、体系符合我国高等教育本科“线性代数”课程教学内容和课程体系改革的总体目标.本书主要是为应用型本科院校相关专业编写的线性代数教材,强调以培养具有较强的实践能力和创新能力的应用型高级人才为宗旨.

本书共计五章.内容包括行列式、矩阵、线性方程组、矩阵的特征值与特征向量及二次型等.本书在编写过程中,充分吸收国内外同类教材的优点,结合作者多年的教学实践和教学改革的实际经验,注重知识的系统性、思想性与通用性,精炼理论证明过程,注意控制知识深度,适当侧重基础运算和数学思想传授.

全书在编写时注意突出以下几个特点:

(1)线性代数是数学的一个重要分支,行列式、矩阵和向量是重要的代数工具,线性问题往往涉及行列式、矩阵和向量.本教材以线性方程组为主线,以矩阵理论、向量空间及与线性变换密切相关的方阵的特征值与二次型等为主要内容.突出重点,分散难点,化难为易,易教易学.

(2)本教材在注意保持数学学科本身结构的科学性、系统性、严谨性的同时,力求深入浅出,通俗易懂,突出有关理论、方法的应用.教材的编写侧重于对线性代数的基本内容和方法的掌握,适当削减了一些烦琐的推导证明,力求使学生在相对较少的学时里就能较系统地掌握该课程的基本内容.

(3)书中例题和习题的编排主要针对基础知识和基本的运算能力训练,也有少量需要特殊技巧的例题和习题,并且在每章后配备了复习题,便于学生巩固所学的基本概念、基本理论,习题难易适度,既适应学生的基本需求,又满足考研的需要.

(4)本书后记:词作《蝶恋花·学习线性代数》及其注释,力图以简短文字记述线性代数发展简史及一些著名数学家的学术成就、道德品质、个人风范及巨大贡献.学一点数学史,使学生了解线性代数创立发展的背景及发展进程.提高学生对数学源流的认识,开阔学生的视野,培养学生的学习兴趣,必有助于激发学习的积极主动性,并激励后来者为继承与发展做出应有的贡献.

索隐穷源深钻研,引经据典古今观,
超逸绝尘妙联想,慧心巧思构佳篇,
珠玑咳唾惊世语,酣畅淋漓言尽欢,
研精钩深博众采,坦荡寄语天地间.

全书由北京数学会原常务理事、高职高专教育工作委员会原主任金桂堂,南开大学教授肖马成担任主编.

疏漏和不足之处,敬请读者指正.

编 者
2016 年 5 月

目 录

第一章 行列式	1
§ 1.1 二阶与三阶行列式	1
一、二阶行列式	1
二、三阶行列式	3
习题 1.1	5
§ 1.2 n 阶行列式	6
一、排列与逆序	6
二、 n 阶行列式	6
习题 1.2	9
§ 1.3 n 阶行列式的性质	10
一、对换	10
二、 n 阶行列式的性质	11
习题 1.3	17
§ 1.4 行列式按行(列)展开	18
一、余子式和代数余子式	18
二、行列式按行(或列)展开定理	19
习题 1.4	25
§ 1.5 克拉默法则	26
习题 1.5	29
复习题一	30
第二章 矩阵	34
§ 2.1 矩阵的概念	34
一、引例	34
二、矩阵的概念	34
§ 2.2 矩阵的运算	38
一、矩阵的加法和数与矩阵的乘积(简称数乘)	38
二、矩阵的乘法	40
三、矩阵的转置	46
四、对称矩阵与反对称矩阵	48

五、方阵的行列式	49
习题 2.2	50
§ 2.3 逆矩阵	51
一、逆矩阵的概念	51
二、用伴随矩阵求逆矩阵	51
三、可逆矩阵的运算规律	54
习题 2.3	57
§ 2.4 分块矩阵	58
一、分块矩阵的概念	58
二、分块矩阵的有关运算	60
三、分块矩阵与线性方程组	65
习题 2.4	67
§ 2.5 矩阵的初等变换	68
一、矩阵的初等变换	68
二、初等矩阵	71
习题 2.5	80
§ 2.6 矩阵的秩	81
一、矩阵秩的概念及有关定理	81
二、用初等行变换求矩阵的秩	83
习题 2.6	86
复习题二	87
第三章 线性方程组	90
§ 3.1 解线性方程组的消元法	90
一、高斯消元法	90
二、非齐次线性方程组的解的讨论	93
三、齐次线性方程组的解的讨论	98
四、用初等行变换求解矩阵方程	99
习题 3.1	100
§ 3.2 向量组的线性相关性	101
一、向量组及其线性组合	101
二、向量组的线性相关性	107
三、向量组的秩	112
习题 3.2	116
§ 3.3 线性方程组解的结构	117
一、齐次线性方程组解的结构	118
二、非齐次线性方程组解的结构	123

习题 3.3	126
复习题三	127
第四章 矩阵的特征值与特征向量	131
§ 4.1 方阵的特征值与特征向量	131
一、特征值与特征向量	131
二、特征值和特征向量的简单性质	134
习题 4.1	136
§ 4.2 n 维向量空间	136
一、向量空间与子空间	136
二、向量的内积	140
三、向量正交	141
四、正交矩阵	144
习题 4.2	146
§ 4.3 相似矩阵与矩阵的对角化	146
一、相似矩阵	146
二、对称矩阵的对角化	150
习题 4.3	153
复习题四	154
第五章 二次型	157
§ 5.1 二次型及其标准形	157
一、二次型及其标准形	157
二、用正交变换法化二次型成标准形	160
三、用配方法化二次型成标准形	164
习题 5.1	166
§ 5.2 正定二次型	166
一、正定二次型的概念	166
二、正定二次型的判定	168
习题 5.2	170
复习题五	171
参考答案与提示	174
后记	189

第一章 行列式

在经济生活、工程技术和科学管理活动中,经常遇到有关若干变量之间线性关系的问题,而这些问题往往都可以归结为求解线性方程组. 求解线性方程组是线性代数的主要内容,行列式是解线性方程组的重要工具. 本章将介绍 n 阶行列式的定义、性质及其运算,并介绍求解 n 元线性方程组的克拉默(Cramer)法则.

§ 1.1 二阶与三阶行列式

一、二阶行列式

行列式的概念源于用消元法求解线性方程组.

设二元线性方程组

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 = b_1, \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 = b_2. \end{cases} \quad (1)$$

其中 $x_j (j=1,2)$ 是未知量, $a_{ij} (i=1,2; j=1,2)$ 是未知量的系数, $b_i (i=1,2)$ 是常数项.

用加减消元法,在方程组(1)的第一个方程和第二个方程的两端分别乘 a_{22} 与 a_{12} ,然后两式相减,消去未知量 x_2 ,得到

$$(a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21})x_1 = b_1a_{22} - a_{12}b_2,$$

用同样的方法消去 x_1 ,得到

$$(a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21})x_2 = a_{11}b_2 - b_1a_{21},$$

若 $a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21} \neq 0$,则方程组(1)有唯一解

$$\begin{cases} x_1 = \frac{b_1a_{22} - b_2a_{12}}{a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}}, \\ x_2 = \frac{b_2a_{11} - b_1a_{21}}{a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}}. \end{cases} \quad (2)$$

以下分析(2)式的结构,从中找出某种规律. (2)式中的分子、分母都是两个数的乘积的差,其中分母都是 $a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}$,它是由方程组(1)的系数确定的. 若我们将方程组(1)的系数取出,且保持原来的相对位置不变,排成两行两列(横排称为行,纵排称为列)的数表

$$\begin{array}{cc} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{array}$$

那么 $a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}$ 恰好是表中主对角线(从左上角至右下角的对角线)上的两个数的乘积与副对角线(从右上角至左下角的对角线)上的两个数乘积之差.

为了方便起见,引入记号

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} \quad (3)$$

称为二阶行列式. 其由四个数 $a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}$ 排成两行两列, 数 a_{ij} ($i=1, 2; j=1, 2$) 称为行列式的元素, 简称为元. 它的第一个下标 i 称为行标, 表示元素 a_{ij} 位于行列式的第 i 行; 它的第二个下标 j 称为列标, 表示元素 a_{ij} 位于行列式的第 j 列. 此二阶行列式表示算式 $a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}$, 即有

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}.$$

二阶行列式的定义本身也给出了它的计算方法: 主对角线上的两元素之积取正号, 次对角线上的两元素之积取负号. 这种算法称为二阶行列式的**对角线法则**.

由于二阶行列式(3)是由二元线性方程组(1)中 x_1, x_2 的各项系数组成的, 故称为系数行列式. 记方程组(1)的系数行列式为

$$D = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}.$$

同样地, 记

$$D_1 = \begin{vmatrix} b_1 & a_{12} \\ b_2 & a_{22} \end{vmatrix} = b_1a_{22} - a_{12}b_2, D_2 = \begin{vmatrix} a_{11} & b_1 \\ a_{21} & b_2 \end{vmatrix} = a_{11}b_2 - b_1a_{21}.$$

其中 D_1 是用常数项 b_1, b_2 替换 D 中的第一列元素得到的二阶行列式, D_2 是用常数项 b_1, b_2 替换 D 中的第二列元素得到的二阶行列式. 这样, 当 $D \neq 0$ 时, 方程组(1)的唯一解可以表示为

$$x_1 = \frac{D_1}{D} = \frac{\begin{vmatrix} b_1 & a_{12} \\ b_2 & a_{22} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix}}, x_2 = \frac{D_2}{D} = \frac{\begin{vmatrix} a_{11} & b_1 \\ a_{21} & b_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix}}. \quad (4)$$

例 1 用行列式解二元线性方程组

$$\begin{cases} 3x_1 + 2x_2 = 7, \\ 2x_1 - 5x_2 = -8. \end{cases}$$

解 因为

$$D = \begin{vmatrix} 3 & 2 \\ 2 & -5 \end{vmatrix} = -15 - 4 = -19 \neq 0,$$

而

$$D_1 = \begin{vmatrix} 7 & 2 \\ -8 & -5 \end{vmatrix} = -35 - (-16) = -19,$$

$$D_2 = \begin{vmatrix} 3 & 7 \\ 2 & -8 \end{vmatrix} = -24 - 14 = -38.$$

所以方程组的解为

$$x_1 = \frac{D_1}{D} = \frac{-19}{-19} = 1, x_2 = \frac{D_2}{D} = \frac{-38}{-19} = 2.$$

二、三阶行列式

与二阶行列式类似,为了简单地表达三元线性方程组的解,引入三阶行列式.

设有 9 个数 $a_{ij} (i=1,2,3; j=1,2,3)$ 排成三行三列的数表

$$\begin{array}{ccc} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{array} \quad (5)$$

引入记号

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}$$

称为数表(5)所确定的三阶行列式. 且有

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = a_{11}a_{22}a_{33} + a_{12}a_{23}a_{31} + a_{13}a_{21}a_{32} - a_{11}a_{23}a_{32} - a_{12}a_{21}a_{33} - a_{13}a_{22}a_{31}. \quad (6)$$

由(6)式右端可见,三阶行列式含 $6(=3!)$ 项,每一项均为取自不同行、不同列的三个元素的乘积,再冠以正负号,其计算规律仍遵循对角线法则(如图 1-1):即每条实线(共三条)所连接的三个元素的乘积前面加上正号,每条虚线(共三条)所连接的三个元素的乘积前面加上负号(对角线法则同样适用于二阶行列式).

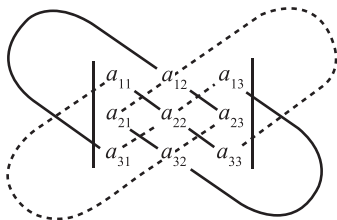


图 1-1

例 2 计算三阶行列式

$$D = \begin{vmatrix} 2 & 3 & 1 \\ 0 & 1 & -2 \\ -1 & 2 & -4 \end{vmatrix}.$$

解 $D = 2 \times 1 \times (-4) + 3 \times (-2) \times (-1) + 1 \times 0 \times 2 - 2 \times (-2) \times 2 - 3 \times 0 \times (-4) - 1 \times 1 \times (-1) = 7.$

例 3 k 满足什么条件时,三阶行列式

$$\begin{vmatrix} k & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \\ 2 & 1 & k \end{vmatrix} = 0?$$

$$\begin{aligned} \text{解} \quad \begin{vmatrix} k & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \\ 2 & 1 & k \end{vmatrix} &= k \times (-1) \times k + 1 \times 1 \times 2 + 0 \times 0 \times 1 - k \times 1 \times 1 - 1 \times \\ &\quad 0 \times k - 0 \times (-1) \times 2 \\ &= -k^2 - k + 2, \end{aligned}$$

由 $k^2 + k - 2 = 0$, 解得 $k = -2$ 或 $k = 1$.

故当 $k = -2$ 或 $k = 1$ 时, 有

$$\begin{vmatrix} k & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \\ 2 & 1 & k \end{vmatrix} = 0.$$

利用三阶行列式, 也可以求解三元线性方程组.

设有三元线性方程组

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 = b_1, \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 = b_2, \\ a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}x_3 = b_3. \end{cases} \quad (7)$$

则有

$$\begin{aligned} D &= \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}, & D_1 &= \begin{vmatrix} b_1 & a_{12} & a_{13} \\ b_2 & a_{22} & a_{23} \\ b_3 & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}, \\ D_2 &= \begin{vmatrix} a_{11} & b_1 & a_{13} \\ a_{21} & b_2 & a_{23} \\ a_{31} & b_3 & a_{33} \end{vmatrix}, & D_3 &= \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & b_1 \\ a_{21} & a_{22} & b_2 \\ a_{31} & a_{32} & b_3 \end{vmatrix}. \end{aligned}$$

这里, 与解二元线性方程组相似, D 是由三元线性方程组(7)中三个未知数的系数按原来的相对位置不变所构成的三阶行列式, 称为(7)的系数行列式. 而 $D_j (j=1, 2, 3)$ 是用常数项 b_1, b_2, b_3 代替 D 中 x_j 的系数 a_{1j}, a_{2j}, a_{3j} 所得的行列式.

若系数行列式 $D \neq 0$, 则线性方程组(7)有唯一解

$$x_1 = \frac{D_1}{D}, x_2 = \frac{D_2}{D}, x_3 = \frac{D_3}{D}.$$

例 4 求解线性方程组

$$\begin{cases} x_1 + 2x_2 + x_3 = 3, \\ -2x_1 + x_2 - x_3 = 7, \\ x_1 + 3x_2 + 2x_3 = 4. \end{cases}$$

解 方程组的系数行列式

$$\begin{aligned} D &= \begin{vmatrix} 1 & 2 & 1 \\ -2 & 1 & -1 \\ 1 & 3 & 2 \end{vmatrix} = 1 \times 1 \times 2 + 2 \times (-1) \times 1 + 1 \times (-2) \times 3 - 1 \times (-1) \times \\ &\quad 3 - 2 \times (-2) \times 2 - 1 \times 1 \times 1 \\ &= 2 - 2 - 6 + 3 + 8 - 1 = 4 \neq 0. \end{aligned}$$

而

$$D_1 = \begin{vmatrix} 3 & 2 & 1 \\ 7 & 1 & -1 \\ 4 & 3 & 2 \end{vmatrix} = -4, D_2 = \begin{vmatrix} 1 & 3 & 1 \\ -2 & 7 & -1 \\ 1 & 4 & 2 \end{vmatrix} = 12, D_3 = \begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 \\ -2 & 1 & 7 \\ 1 & 3 & 4 \end{vmatrix} = -8,$$

所以方程组的解为

$$x_1 = \frac{D_1}{D} = \frac{-4}{4} = -1, x_2 = \frac{D_2}{D} = \frac{12}{4} = 3, x_3 = \frac{D_3}{D} = \frac{-8}{4} = -2.$$

由上述可知, 对于未知数个数等于方程个数的二元、三元线性方程组, 且当其系数行列式不等于零时, 利用行列式这一工具求解十分简便. 然而对于 n 个 ($n > 3$) 方程组成的 n 元线性方程组, 是否也有类似的结果, 这就需要引入 n 阶行列式的定义.

习题 1.1

1. 计算下列行列式:

$$(1) \begin{vmatrix} x+1 & 1 \\ x^2 & x-1 \end{vmatrix}; \quad (2) \begin{vmatrix} \frac{1+t^2}{1-t^2} & \frac{2t}{1-t^2} \\ \frac{2t}{1-t^2} & \frac{1+t^2}{1-t^2} \end{vmatrix};$$

$$(3) \begin{vmatrix} 1+\sqrt{2} & 2-\sqrt{3} \\ 2+\sqrt{3} & 1-\sqrt{2} \end{vmatrix}; \quad (4) \begin{vmatrix} \sin \alpha & \cos \alpha \\ \sin \beta & \cos \beta \end{vmatrix}.$$

2. 计算下列行列式:

$$(1) \begin{vmatrix} 4 & 2 & 3 \\ 2 & 3 & 0 \\ 3 & 0 & 0 \end{vmatrix}; \quad (2) \begin{vmatrix} 2 & 1 & 2 \\ -4 & 3 & 1 \\ 2 & 3 & 5 \end{vmatrix};$$

$$(3) \begin{vmatrix} a & b & 0 \\ c & 0 & b \\ 0 & c & a \end{vmatrix}; \quad (4) \begin{vmatrix} a & a & a \\ -a & a & x \\ -a & -a & x \end{vmatrix}.$$

3. 用二阶行列式解二元线性方程组:

$$(1) \begin{cases} 6x_1 - 4x_2 = 10, \\ 5x_1 - 7x_2 = 29; \end{cases} \quad (2) \begin{cases} 6x_1 + 5x_2 = 4, \\ 5x_1 - 7x_2 = -19. \end{cases}$$

4. 用三阶行列式解三元线性方程组:

$$(1) \begin{cases} x_1 + x_2 - 2x_3 = -3, \\ 5x_1 - 2x_2 + 7x_3 = 22, \\ 2x_1 - 5x_2 + 4x_3 = 4; \end{cases} \quad (2) \begin{cases} 5x_1 + 2x_2 + 3x_3 = -2, \\ 2x_1 - 2x_2 + 5x_3 = 0, \\ 3x_1 + 4x_2 + 2x_3 = -10; \end{cases}$$

$$(3) \begin{cases} 2x_1 + 3x_2 + 4x_3 = 16, \\ x_1 + 4x_2 + 2x_3 = 13, \\ 3x_1 + x_2 + x_3 = 7; \end{cases} \quad (4) \begin{cases} 5x_1 + 3x_2 + 3x_3 = 48, \\ 2x_1 + 6x_2 - 3x_3 = 18, \\ 8x_1 - 3x_2 + 2x_3 = 21. \end{cases}$$

§ 1.2 n 阶行列式

为了引入 n 阶行列式的定义,先介绍排列与逆序的有关知识.

一、排列与逆序

由正整数 $1, 2, \dots, n$ 组成的不重复的有序数组,称为一个 n 阶排列.

如 12 和 21 都是二阶排列;123 和 213 都是三阶排列;1234 和 2134 都是四阶排列等.

显然,由正整数 $1, 2, \dots, n$ 组成的 n 阶排列的总数为 $n \cdot (n-1) \cdot \dots \cdot 2 \cdot 1 = n!$ 个.所有的 n 阶排列中只有排列 $12 \cdots n$ 是由小到大按自然顺序排列的,称为自然序排列.

定义 1 若在某个 n 阶排列 $p_1 p_2 \cdots p_n$ 中,有较大的数排在较小的数的前面,则这两个数构成一个逆序.一个 n 阶排列中逆序的总数称为它的逆序数,记作 $\tau(p_1 p_2 \cdots p_n)$.

逆序数是奇数的排列称为奇排列;逆序数是偶数的排列称为偶排列.

如二阶排列共有 $2! = 2$ 个,即

$$12, 21.$$

其中 12 的逆序数 $\tau(12) = 0$,故 12 是偶排列;21 的逆序数 $\tau(21) = 1$,故 21 是奇排列.

三阶排列共有 $3! = 6$ 个,即

$$123, 231, 312, 132, 213, 321.$$

其中 $\tau(123) = 0, \tau(231) = 2, \tau(312) = 2$,故 123, 231, 312 都是偶排列; $\tau(132) = 1, \tau(213) = 1, \tau(321) = 3$,故 132, 213, 321 都是奇排列.

例 1 求五阶排列 25413 的逆序数,并说明是奇排列还是偶排列.

解 2 在首位,2 与其后的每一个元素做大小比较,有 21,逆序数为 1;

5 在第二位,5 与其后的每一个元素做大小比较,有 54、51、53,逆序数为 3;

4 在第三位,4 与其后的每一个元素做大小比较,有 41、43,逆序数为 2;

1 在第四位,1 与其后的每一个元素做大小比较,逆序数为 0;

3 在最末位,逆序数为 0.

故这个排列的逆序数为 $1+3+2+0+0=6$,即 $\tau(25413)=6$,可知五阶排列 25413 是偶排列.

二、 n 阶行列式

先来研究二阶行列式、三阶行列式的结构:

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21},$$

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = a_{11}a_{22}a_{33} + a_{12}a_{23}a_{31} + a_{13}a_{21}a_{32} - a_{11}a_{23}a_{32} - a_{12}a_{21}a_{33} - a_{13}a_{22}a_{31}.$$

容易看出:

(1) 二阶行列式表示的代数式的每一项都是取自不同行不同列的两个数的乘积,每一项除符号外可以写成 $a_{1p_1}a_{2p_2}$ (这里行标按自然序排列,列标是一个二阶排列).

类似地,三阶行列式的每一项可以写成 $a_{1p_1}a_{2p_2}a_{3p_3}$ (这里行标按自然序排列,列标是一个三阶排列).

(2)当列标 p_1, p_2 取遍所有的二阶排列(12, 21)时,就得到二阶行列式的所有的项,共 $2! = 2$ 项.

类似地,当列标 p_1, p_2, p_3 取遍所有的三阶排列(123, 231, 312, 132, 213, 321)时,就得到三阶行列式的所有的项,共 $3! = 6$ 项.

(3)每一项的符号是:当这一项的行标按自然序排列时,如果对应的列标构成的排列是偶排列则该项取正号,是奇排列则该项取负号.

二阶行列式表示的代数和中,带正号的一项列标排列是 12;带负号的一项列标排列是 21.

三阶行列式表示的代数和中,带正号的三项列标排列是 123, 231, 312;带负号的三项列标排列是 132, 213, 321.

所以,各项所带的正负号可以表示为 $(-1)^\tau$, 其中 τ 是列标排列的逆序数.

通过上述分析可知,二阶行列式可表示为

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} = \sum_{(p_1 p_2)} (-1)^{\tau(p_1 p_2)} a_{1p_1} a_{2p_2},$$

其中 $\tau(p_1 p_2)$ 是二阶排列 $p_1 p_2$ 的逆序数, $\sum_{(p_1 p_2)}$ 表示对所有二阶排列 $p_1 p_2$ 对应的所有项的求和.

三阶行列式可表示为

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = \sum_{(p_1 p_2 p_3)} (-1)^{\tau(p_1 p_2 p_3)} a_{1p_1} a_{2p_2} a_{3p_3},$$

其中 $\tau(p_1 p_2 p_3)$ 是三阶排列 $p_1 p_2 p_3$ 的逆序数, $\sum_{(p_1 p_2 p_3)}$ 表示对所有三阶排列 $p_1 p_2 p_3$ 对应的所有项的求和.

类似地,可以把行列式的定义推广到一般情况.

定义 2 设有 n^2 个数 a_{ij} ($i, j = 1, 2, \dots, n$) 排成 n 行(横排为行) n 列(纵排为列),组成的符号

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nm} \end{vmatrix} \quad (1)$$

称为 n 阶行列式. 它表示一个算式,这个算式是所有可能取自不同行不同列的 n 个数的乘积的代数和. 每一项的符号是由该项行标排列和列标排列逆序数之和的奇偶性所决定:

当其行标按自然序排列(自然序排列的逆序数是 0),那么该项的符号就由其相应列标排列的逆序数决定. 如果相应的列标构成的排列是偶排列则取正号,是奇排列则取负号. 其一般项表示为

$$(-1)^{\tau(p_1 p_2 \cdots p_n)} a_{1p_1} a_{2p_2} \cdots a_{np_n},$$

当 $p_1 p_2 \cdots p_n$ 取遍所有的 n 阶排列时, 得到代数和的所有项, 共 $n!$ 项, 其中正、负项各占 $\frac{n!}{2}$ ($n \geq 2$). 所有这 $n!$ 项的代数 and 为

$$\sum_{(p_1 p_2 \cdots p_n)} (-1)^{\tau(p_1 p_2 \cdots p_n)} a_{1p_1} a_{2p_2} \cdots a_{np_n},$$

或当其列标先按自然序排列(自然序排列的逆序数是 0), 那么该项的符号就由其相应行标排列的逆序数决定. 如果相应的行标构成的排列是偶排列则取正号, 是奇排列则取负号. 其一般项为

$$(-1)^{\tau(q_1 q_2 \cdots q_n)} a_{q_1 1} a_{q_2 2} \cdots a_{q_n n},$$

当 $q_1 q_2 \cdots q_n$ 取遍所有的 n 阶排列时, 得到代数 and 的所有项, 共 $n!$ 项, 其中正、负项各占 $\frac{n!}{2}$ ($n \geq 2$). 所有这 $n!$ 项的代数 and 为

$$\sum_{(q_1 q_2 \cdots q_n)} (-1)^{\tau(q_1 q_2 \cdots q_n)} a_{q_1 1} a_{q_2 2} \cdots a_{q_n n}.$$

即

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix} = \sum_{(p_1 p_2 \cdots p_n)} (-1)^{\tau(p_1 p_2 \cdots p_n)} a_{1p_1} a_{2p_2} \cdots a_{np_n} \\ = \sum_{(q_1 q_2 \cdots q_n)} (-1)^{\tau(q_1 q_2 \cdots q_n)} a_{q_1 1} a_{q_2 2} \cdots a_{q_n n}.$$

n 阶行列式(1)简记作 $\det(a_{ij})$, 其中 a_{ij} 为其 (i, j) 元.

当 $n=1$ 时, 规定一阶行列式 $|a| = a$. (注意不要与绝对值符号相混淆)

例 2 证明 n 阶行列式

$$\begin{vmatrix} \lambda_1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda_{n-1} & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & \lambda_n \end{vmatrix} = \lambda_1 \lambda_2 \cdots \lambda_n, \quad (2)$$

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 & \lambda_1 \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda_2 & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & \lambda_{n-1} & \cdots & 0 & 0 \\ \lambda_n & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{vmatrix} = (-1)^{\frac{n(n-1)}{2}} \lambda_1 \lambda_2 \cdots \lambda_n. \quad (3)$$

其中式(2)左端行列式主对角线上的元素是 λ_i ($i=1, 2, \cdots, n$), 式(3)左端行列式次对角线上的元素是 λ_i ($i=1, 2, \cdots, n$), 其他位置元素都是 0.

证 式(2)左端行列式为对角行列式, 其结果是显然的. 下面证明式(3).

令 $\lambda_i = a_{i(n-i+1)}$, 则

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 & \lambda_1 \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda_2 & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & \lambda_{n-1} & \cdots & 0 & 0 \\ \lambda_n & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 & a_{1n} \\ 0 & 0 & \cdots & a_{2(n-1)} & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & a_{(n-1)2} & \cdots & 0 & 0 \\ a_{n1} & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{vmatrix} \\ = (-1)^\tau a_{1n} a_{2(n-1)} \cdots a_{(n-1)2} a_{n1},$$

其中 τ 是 n 阶排列 $n(n-1)\cdots 21$ 的逆序数, 故

$$\tau = 0 + 1 + \cdots + (n-2) + (n-1) = \frac{n(n-1)}{2}.$$

即

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 & \lambda_1 \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda_2 & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & \lambda_{n-1} & \cdots & 0 & 0 \\ \lambda_n & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{vmatrix} = (-1)^{\frac{n(n-1)}{2}} \lambda_1 \lambda_2 \cdots \lambda_n.$$

例 3 证明下三角形行列式

$$D = \begin{vmatrix} a_{11} & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ a_{(n-1)1} & a_{(n-1)2} & \cdots & a_{(n-1)(n-1)} & 0 \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{n(n-1)} & a_{nn} \end{vmatrix} = a_{11} a_{22} \cdots a_{nn}. \quad (4)$$

证 主对角线以上的元素都是 0 的行列式称为下三角形行列式. 由于 (列标) $j > (\text{行标}) i$ 时, $a_{ij} = 0$. 故 D 中可能不为 0 的元素 a_{ip_i} , 其下标应满足 $p_i \leq i$, 即有 $p_1 \leq 1, p_2 \leq 2, \cdots, p_n \leq n$.

在所有 n 阶排列 $p_1 p_2 \cdots p_n$ 中能满足上述条件的排列只有一个自然序排列 $12 \cdots n$, 所以 D 中可能不为 0 的项只有一项 $(-1)^\tau a_{11} a_{22} \cdots a_{nn}$. 而此项的符号 $(-1)^{\tau(12 \cdots n)} = (-1)^0 = 1$, 所以

$$D = a_{11} a_{22} \cdots a_{nn}.$$

习题 1.2

1. 求下列排列的逆序数, 并指出它们的奇偶性.

- (1) 32541; (2) 421653;
(3) 562138479; (4) $n(n-1)\cdots 321$.

2. 选择 i, j , 使得

- (1) 1i74256j9 成偶排列; (2) 1625i489j 成奇排列.

3. 设六阶行列式

$$D_6 = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{26} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{61} & a_{62} & \cdots & a_{66} \end{vmatrix}.$$

(1) D_6 的展开式中一共有多少项?

(2) 在 D_6 的展开式中, 乘积 $a_{11}a_{26}a_{32}a_{44}a_{53}a_{65}$, $a_{61}a_{52}a_{43}a_{34}a_{25}a_{16}$ 各取什么符号?

(3) 在 D_6 的展开式中, 含有因子 $a_{21}a_{34}a_{46}$ 的项共有几项?

(4) 在 D_6 的展开式中, 写出含有因子 $a_{21}a_{34}a_{46}$ 且带负号的项.

4. 用行列式定义计算下列行列式:

$$(1) \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & a_{14} \\ 0 & 0 & a_{23} & a_{24} \\ 0 & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{vmatrix};$$

$$(2) \begin{vmatrix} a_{11} & 0 & 0 & a_{14} \\ 0 & a_{22} & a_{23} & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & 0 \\ a_{41} & 0 & 0 & a_{44} \end{vmatrix};$$

$$(3) \begin{vmatrix} 0 & a_{12} & a_{13} & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} \\ 0 & a_{42} & a_{43} & 0 & 0 \\ 0 & a_{52} & a_{53} & 0 & 0 \end{vmatrix};$$

$$(4) \begin{vmatrix} 0 & \cdots & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \cdots & 2 & 0 & 0 \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\ n-1 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & n \end{vmatrix}.$$

§ 1.3 n 阶行列式的性质

一、对换

为了研究 n 阶行列式的性质, 先来讨论对换与排列的奇偶性的关系.

定义 在 n 阶排列中, 将任意两个元素对调, 其余的元素不动, 称为对排列的一次对换. 将相邻两个元素对换称为相邻对换.

例如五阶排列 25413 中的 5 与 3 对换, 得到新的五阶排列 23415. $\tau(25413) = 6$, 25413 为偶排列, 而 $\tau(23415) = 3$, 23415 为奇排列. 显然经过一次对换就改变了排列的奇偶性. 这一结论具有一般性.

定理 1 一个排列中的任意两个元素对换, 则排列的奇偶性改变.

证 先证相邻对换的情况.

设排列为 $a_1a_2\cdots a_sabb_1b_2\cdots b_k$, 对换 a 与 b , 变为 $a_1a_2\cdots a_sbab_1b_2\cdots b_k$. 显然, $a_1a_2\cdots a_s$; $b_1b_2\cdots b_k$ 这些元素的逆序数经过对换并不改变, 而 a, b 两元素的逆序数应改变: 当 $a < b$ 时, 经对换后 a 的逆序数增加 1, 而 b 的逆序数不变; 当 $a > b$ 时, 经对换后 a 的逆序数不变, 而 b 的逆序数减少 1. 所以排列 $a_1a_2\cdots a_sabb_1b_2\cdots b_k$ 与排列 $a_1a_2\cdots a_sbab_1b_2\cdots b_k$ 的奇偶性改变.

再证一般对换的情况.

设排列为 $a_1 a_2 \cdots a_s a b_1 b_2 \cdots b_k b c_1 \cdots c_m$, 把它作 k 次相邻对换, 变为 $a_1 a_2 \cdots a_s a b b_1 b_2 \cdots b_k c_1 \cdots c_m$, 再作 $k+1$ 次相邻对换, 变为 $a_1 a_2 \cdots a_s b b_1 b_2 \cdots b_k a c_1 \cdots c_m$. 综上所述, 共经过 $2k+1$ 次对换, 由排列 $a_1 a_2 \cdots a_s a b_1 b_2 \cdots b_k b c_1 \cdots c_m$ 变为排列 $a_1 a_2 \cdots a_s b b_1 b_2 \cdots b_k a c_1 \cdots c_m$. 所以这两个排列的奇偶性相反.

推论 将奇排列变成自然序排列的对换次数为奇数, 将偶排列变成自然序排列的对换次数为偶数.

证 由定理 1 可知, 对换的次数就是排列奇偶性的变化次数, 自然序排列是偶排列 (其逆序数为 0), 所以推论成立.

例 1 (1) 说明 4 阶行列式共有多少项?

(2) 写出 4 阶行列式中所有带有负号且含因子 a_{23} 的项.

解 (1) 4 阶行列式共有 $4! = 24$ 项, 其中正、负项各有 12 项.

(2) 设满足给定条件的项为 $a_{1p_1} a_{2p_2} a_{3p_3} a_{4p_4}$, 其行标按自然序排列, 要使其带负号, 必须使其列标所构成的排列 $p_1 p_2 p_3 p_4$ 为奇排列, 这里 $p_2 = 3$, 而 p_1, p_3, p_4 只能取 1、2、4 中的数. 如取 $p_1 = 1, p_3 = 2, p_4 = 4$, 得排列 1324, 它的逆序数是 1, 为奇排列. 再根据改变排列奇偶性的定理, 3 在第二个位置不动, 其他位置上的元素连续对换两次, 可得 2341, 4312 也为奇排列, 而且再也没有满足给定条件别的奇排列. 则对应于以上三个奇排列的三项为

$$a_{11} a_{23} a_{32} a_{44}, a_{12} a_{23} a_{34} a_{41}, a_{14} a_{23} a_{31} a_{42}.$$

下面讨论行列式的性质.

二、 n 阶行列式的性质

记

$$D = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}, D^T = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{21} & \cdots & a_{n1} \\ a_{12} & a_{22} & \cdots & a_{n2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{1n} & a_{2n} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix},$$

称 D^T 为 D 的转置行列式.

性质 1 行列式与它的转置行列式相等, 即 $D = D^T$.

证 记 $D = \det(a_{ij})$ 的转置行列式

$$D^T = \begin{vmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nn} \end{vmatrix}$$

即 D^T 的 (i, j) 元为 b_{ij} , 则 $b_{ij} = a_{ji} (i, j = 1, 2, \cdots, n)$. 所以

$$D^T = \sum_{(p_1 p_2 \cdots p_n)} (-1)^{\tau(p_1 p_2 \cdots p_n)} b_{1p_1} b_{2p_2} \cdots b_{np_n} = \sum_{(p_1 p_2 \cdots p_n)} (-1)^{\tau(p_1 p_2 \cdots p_n)} a_{p_1 1} a_{p_2 2} \cdots a_{p_n n}.$$

根据行列式定义, 有

$$D = \sum_{(p_1 p_2 \cdots p_n)} (-1)^{\tau(p_1 p_2 \cdots p_n)} a_{1p_1} a_{2p_2} \cdots a_{np_n} = \sum_{(q_1 q_2 \cdots q_n)} (-1)^{\tau(q_1 q_2 \cdots q_n)} a_{q_1 1} a_{q_2 2} \cdots a_{q_n n}.$$

故

$$D=D^T.$$

例如,二阶行列式

$$D=\begin{vmatrix} a_{11} & a_{21} \\ a_{12} & a_{22} \end{vmatrix}=a_{11}a_{22}-a_{21}a_{12},$$

$$D^T=\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix}=a_{11}a_{22}-a_{21}a_{12}.$$

显然有

$$D=D^T.$$

性质 1 表明,行列式中行与列的地位是对称的,因此凡是有关行的性质,对列也同样成立.反之亦然.

性质 2 互换行列式的任意两行(列),行列式仅改变符号.

证 设行列式

$$D_1=\begin{vmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nn} \end{vmatrix}$$

是由行列式 $D=\det(a_{ij})$ 对换 i, j 两行得到的,即当 $k \neq i, j$ 时, $b_{kp} = a_{kp}$; 当 $k = i, j$ 时, $b_{ip} = a_{jp}, b_{jp} = a_{ip}$, 于是

$$\begin{aligned} D_1 &= \sum (-1)^\tau b_{1p_1} \cdots b_{ip_i} \cdots b_{jp_j} \cdots b_{np_n} \\ &= \sum (-1)^\tau a_{1p_1} \cdots a_{jp_i} \cdots a_{ip_j} \cdots a_{np_n} \\ &= \sum (-1)^\tau a_{1p_1} \cdots a_{ip_j} \cdots a_{jp_i} \cdots a_{np_n}, \end{aligned}$$

其中 $1 \cdots i \cdots j \cdots n$ 为自然序排列, τ 为排列 $p_1 \cdots p_i \cdots p_j \cdots p_n$ 的逆序数. 设排列 $p_1 \cdots p_j \cdots p_i \cdots p_n$ 的逆序数为 τ_1 , 则 $(-1)^\tau = -(-1)^{\tau_1}$, 故

$$D_1 = - \sum (-1)^{\tau_1} a_{1p_1} \cdots a_{ip_j} \cdots a_{jp_i} \cdots a_{np_n}.$$

即

$$D_1 = -D.$$

例如,对二阶行列式互换两列,有

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{21} \\ a_{12} & a_{22} \end{vmatrix} = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21} = -(a_{12}a_{21} - a_{11}a_{22}) = - \begin{vmatrix} a_{12} & a_{11} \\ a_{22} & a_{21} \end{vmatrix}.$$

通常用 r_i 表示行列式的第 i 行,用 c_i 表示第 i 列. 交换 i, j 两行记作 $r_i \leftrightarrow r_j$, 交换 i, j 两列记作 $c_i \leftrightarrow c_j$.

推论 行列式中两行(列)对应元素相同,那么这个行列式等于零.

证 把这两行对换,有 $D = -D$, 故 $D = 0$.

性质 3 行列式中某一行(列)中所有元素都乘同一个数 k , 等于用数 k 乘此行列式.

例如,

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ ka_{21} & ka_{22} & ka_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = k \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}.$$

通常第 i 行(或列)乘 k , 记作 $r_i \times k$ (或 $c_i \times k$).

推论 1 行列式中某一行(列)的所有元素的公因子可以提到行列式符号的外面.

推论 2 行列式中某一行(列)中所有元素全为零, 那么这个行列式等于零.

性质 4 行列式中有两行(列)对应元素成比例, 那么这个行列式等于零.

性质 5 若行列式的某一行(列)的各元素是两数之和, 则可将行列式写成两个行列式之和.

例如,

$$\begin{vmatrix} a_{11}+b_{11} & a_{12}+b_{12} & a_{13}+b_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}.$$

性质 6 把行列式的某一行(列)的各元素乘同一个数后加到另一行(列)对应元素上去, 行列式的值不变.

例如,

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} \xrightarrow{r_2+kr_1} \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21}+ka_{11} & a_{22}+ka_{12} & a_{23}+ka_{13} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}.$$

通常数 k 乘行列式中第 i 行(或列)加到第 j 行(或列)上, 记作 r_j+kr_i (或 c_j+kc_i).

以上性质请读者证之.

上述性质, 在行列式的计算中应用非常广泛, 其中性质 2、3、6 是行列式关于行和关于列的三种主要运算, 即 $r_i \leftrightarrow r_j$ 、 $r_i \times k$ 、 r_j+kr_i 和 $c_i \leftrightarrow c_j$ 、 $c_i \times k$ 、 c_j+kc_i . 特别是利用 r_j+kr_i (或 c_j+kc_i) 可以把行列式中许多元素化为 0, 从而简化计算.

例 2 计算行列式

$$\begin{vmatrix} 1 & 2 & 1 & 4 \\ 0 & -1 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 3 \\ 0 & 1 & 3 & 1 \end{vmatrix}.$$

解 化为上三角形行列式

$$\begin{vmatrix} 1 & 2 & 1 & 4 \\ 0 & -1 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 3 \\ 0 & 1 & 3 & 1 \end{vmatrix} \xrightarrow{r_3+(-1)r_1} \begin{vmatrix} 1 & 2 & 1 & 4 \\ 0 & -1 & 2 & 1 \\ 0 & -2 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 3 & 1 \end{vmatrix} \xrightarrow{r_4 \leftrightarrow r_2} \begin{vmatrix} 1 & 2 & 1 & 4 \\ 0 & 1 & 3 & 1 \\ 0 & -2 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 2 & 1 \end{vmatrix} \\ \xrightarrow{\substack{r_3+2r_2 \\ r_4+r_2}} \begin{vmatrix} 1 & 2 & 1 & 4 \\ 0 & 1 & 3 & 1 \\ 0 & 0 & 6 & 1 \\ 0 & 0 & 5 & 2 \end{vmatrix} \xrightarrow{c_4 \leftrightarrow c_3} \begin{vmatrix} 1 & 2 & 4 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 3 \\ 0 & 0 & 1 & 6 \\ 0 & 0 & 2 & 5 \end{vmatrix} \xrightarrow{r_4+(-2)r_3} \begin{vmatrix} 1 & 2 & 4 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 3 \\ 0 & 0 & 1 & 6 \\ 0 & 0 & 0 & -7 \end{vmatrix} = -7.$$

利用行列式性质,化行列式为上三角形行列式的计算方法称为化三角形法.

例 3 计算行列式

$$\begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 4 & 1 & 2 & 3 \\ 3 & 4 & 1 & 2 \\ 2 & 3 & 4 & 1 \end{vmatrix}.$$

解 此行列式的特点是各行(列)元素的和都是 10,故把第 2、3、4 列同时加到第 1 列,再将第 1 列提出公因子 10,然后第 2、3、4 行减第 1 行,有

$$\begin{aligned} & \begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 4 & 1 & 2 & 3 \\ 3 & 4 & 1 & 2 \\ 2 & 3 & 4 & 1 \end{vmatrix} \xrightarrow{c_1+(c_2+c_3+c_4)} \begin{vmatrix} 10 & 2 & 3 & 4 \\ 10 & 1 & 2 & 3 \\ 10 & 4 & 1 & 2 \\ 10 & 3 & 4 & 1 \end{vmatrix} \xrightarrow{c_1 \div 10} 10 \begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 1 & 1 & 2 & 3 \\ 1 & 4 & 1 & 2 \\ 1 & 3 & 4 & 1 \end{vmatrix} \\ & \xrightarrow{\substack{r_i-r_1 \\ i=2,3,4}} 10 \begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 0 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 2 & -2 & -2 \\ 0 & 1 & 1 & -3 \end{vmatrix} \xrightarrow{\substack{r_3+2r_2 \\ r_4+r_2}} 10 \begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 0 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & -4 & -4 \\ 0 & 0 & 0 & -4 \end{vmatrix} = -160. \end{aligned}$$

例 4 计算行列式

$$D = \begin{vmatrix} 1+a & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1-a & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1+b & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1-b \end{vmatrix}.$$

解 化为上三角形行列式

$$\begin{aligned} D & \xrightarrow{\substack{r_1-r_2 \\ r_3-r_4}} \begin{vmatrix} a & a & 0 & 0 \\ 1 & 1-a & 1 & 1 \\ 0 & 0 & b & b \\ 1 & 1 & 1 & 1-b \end{vmatrix} = ab \begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1-a & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1-b \end{vmatrix} \\ & \xrightarrow{\substack{r_2-r_1 \\ r_4-r_1-r_3}} ab \begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -a & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -b \end{vmatrix} = a^2 b^2. \end{aligned}$$

例 5 计算行列式

$$D = \begin{vmatrix} 0 & a_1 & a_2 & a_3 & a_4 \\ -a_1 & 0 & b_1 & b_2 & b_3 \\ -a_2 & -b_1 & 0 & c_1 & c_2 \\ -a_3 & -b_2 & -c_1 & 0 & d \\ -a_4 & -b_3 & -c_2 & -d & 0 \end{vmatrix}.$$

解 根据性质 1,有

$$D=D^T=\begin{vmatrix} 0 & -a_1 & -a_2 & -a_3 & -a_4 \\ a_1 & 0 & -b_1 & -b_2 & -b_3 \\ a_2 & b_1 & 0 & -c_1 & -c_2 \\ a_3 & b_2 & c_1 & 0 & -d \\ a_4 & b_3 & c_2 & d & 0 \end{vmatrix},$$

每一行提 (-1) ,得

$$D=(-1)^5\begin{vmatrix} 0 & a_1 & a_2 & a_3 & a_4 \\ -a_1 & 0 & b_1 & b_2 & b_3 \\ -a_2 & -b_1 & 0 & c_1 & c_2 \\ -a_3 & -b_2 & -c_1 & 0 & d \\ -a_4 & -b_3 & -c_2 & -d & 0 \end{vmatrix}=-D.$$

则有 $2D=0$, 即 $D=0$.

注:该行列式的特点是:第 (i,j) 元与第 (j,i) 元互为相反数,即 $a_{ij}=-a_{ji}$,称该行列式为反对称行列式.用类似上述方法可以证明:奇数阶反对称行列式等于零.

例 6 计算 $n(n \geq 3)$ 阶行列式

$$D=\begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 \\ 1 & 0 & x & \cdots & x & x \\ 1 & x & 0 & \cdots & x & x \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 1 & x & x & \cdots & 0 & x \\ 1 & x & x & \cdots & x & 0 \end{vmatrix}.$$

解 把第 1 行的 $(-x)$ 倍分别加到第 2 行, ..., 第 n 行,得

$$D=\begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 \\ 1 & -x & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -x & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & 0 & \cdots & -x & 0 \\ 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & -x \end{vmatrix},$$

当 $x \neq 0$ 时,把第 j 列的 $\frac{1}{x}$ 倍加到第 1 列($j=2, \dots, n$),则 D 化为上三角形行列式

$$D=\begin{vmatrix} \frac{n-1}{x} & 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 \\ 0 & -x & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -x & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & -x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & -x \end{vmatrix}=(-1)^{n-1}(n-1)x^{n-2}.$$

当 $x=0$ 时,显然 $D=0$. 所以总有

$$D = (-1)^{n-1} (n-1) x^{n-2}.$$

例 7 设

$$D = \begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1k} & & & \\ \vdots & & \vdots & & 0 & \\ a_{k1} & \cdots & a_{kk} & & & \\ c_{11} & \cdots & c_{1k} & b_{11} & \cdots & b_{1n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ c_{n1} & \cdots & c_{nk} & b_{n1} & \cdots & b_{nm} \end{vmatrix},$$

$$D_1 = \det(a_{ij}) = \begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1k} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{k1} & \cdots & a_{kk} \end{vmatrix},$$

$$D_2 = \det(b_{ij}) = \begin{vmatrix} b_{11} & \cdots & b_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ b_{n1} & \cdots & b_{nm} \end{vmatrix},$$

求证 $D = D_1 D_2$.

证 对 D_1 作运算 $r_i + kr_j$, 把 D_1 化为下三角形行列式, 设为

$$D_1 = \begin{vmatrix} p_{11} & & 0 \\ \vdots & \ddots & \\ p_{k1} & \cdots & p_{kk} \end{vmatrix} = p_{11} \cdots p_{kk};$$

对 D_2 作运算 $c_i + kc_j$, 把 D_2 化为下三角形行列式, 设为

$$D_2 = \begin{vmatrix} q_{11} & & 0 \\ \vdots & \ddots & \\ q_{n1} & \cdots & q_{nm} \end{vmatrix} = q_{11} \cdots q_{nm}.$$

于是, 对 D 的前 k 行作运算 $r_i + kr_j$, 再对后 n 列作运算 $c_i + kc_j$, 把 D 化为下三角形行列式

$$D = \begin{vmatrix} p_{11} & & & & & \\ \vdots & \ddots & & & 0 & \\ p_{k1} & \cdots & p_{kk} & & & \\ c_{11} & \cdots & c_{1k} & q_{11} & & \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \ddots & \\ c_{n1} & \cdots & c_{nk} & q_{n1} & \cdots & q_{nm} \end{vmatrix},$$

故

$$D = p_{11} \cdots p_{kk} \cdot q_{11} \cdots q_{nm} = D_1 D_2.$$

例 8 计算 n 阶行列式

$$D_n = \begin{vmatrix} a_1 + b_1 & a_1 + b_2 & \cdots & a_1 + b_n \\ a_2 + b_1 & a_2 + b_2 & \cdots & a_2 + b_n \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_n + b_1 & a_n + b_2 & \cdots & a_n + b_n \end{vmatrix}.$$

解 当 $n=1$ 时, $D_1=a_1+b_1$;

当 $n=2$ 时, $D_2=(a_1-a_2)(b_2-b_1)$;

当 $n \geq 3$ 时, 把第 1 行的 (-1) 倍分别加到第 i 行 ($i=2, 3, \dots, n$), 行列式不变, 得

$$D_n = \begin{vmatrix} a_1+b_1 & a_1+b_2 & \cdots & a_1+b_n \\ a_2-a_1 & a_2-a_1 & \cdots & a_2-a_1 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_n-a_1 & a_n-a_1 & \cdots & a_n-a_1 \end{vmatrix} = 0.$$

综上所述可得

$$D_n = \begin{cases} a_1+b_1, & n=1, \\ (a_1-a_2)(b_2-b_1), & n=2, \\ 0, & n \geq 3. \end{cases}$$

习题 1.3

1. 计算下列行列式:

$$(1) \begin{vmatrix} 2 & 1 & -1 \\ 4 & -1 & 1 \\ 201 & 102 & -99 \end{vmatrix};$$

$$(2) \begin{vmatrix} -2 & 3 & 1 \\ 503 & 201 & 298 \\ 5 & 2 & 3 \end{vmatrix};$$

$$(3) \begin{vmatrix} 3 & 1 & -1 & 2 \\ -5 & 1 & 3 & -4 \\ 2 & 0 & 1 & -1 \\ 1 & -5 & 3 & -3 \end{vmatrix};$$

$$(4) \begin{vmatrix} -2 & 3 & -8 & -1 \\ 1 & -2 & 5 & 0 \\ 3 & 1 & -2 & 4 \\ \frac{1}{2} & 2 & 1 & -\frac{5}{2} \end{vmatrix};$$

$$(5) \begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 2 & 3 & 4 & 5 & 1 \\ 3 & 4 & 5 & 1 & 2 \\ 4 & 5 & 1 & 2 & 3 \\ 5 & 1 & 2 & 3 & 4 \end{vmatrix};$$

$$(6) \begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 2 & 3 & 4 & 5 & 1 \\ 3 & 4 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 5 & 0 & 0 & 0 \\ 5 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}.$$

2. 解下列关于 x 的方程:

$$(1) \begin{vmatrix} 1-x & x & 0 \\ -1 & 1-x & x \\ 0 & -1 & 1-x \end{vmatrix} = 0;$$

$$(2) \begin{vmatrix} x & a & a & a \\ a & x & a & a \\ a & a & x & a \\ a & a & a & x \end{vmatrix} = 0.$$

3. 计算下列 n 阶行列式:

$$(1) \begin{vmatrix} -a_1 & a_1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & -a_2 & a_2 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & -a_{n-1} & a_{n-1} \\ 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 \end{vmatrix};$$

$$(2) \begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 & \cdots & n-1 & n \\ -1 & 0 & 3 & \cdots & n-1 & n \\ -1 & -2 & 0 & \cdots & n-1 & n \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ -1 & -2 & -3 & \cdots & 0 & n \\ -1 & -2 & -3 & \cdots & -(n-1) & 0 \end{vmatrix}.$$

§ 1.4 行列式按行(列)展开

一、余子式和代数余子式

对于三阶行列式,不难发现有如下关系

$$\begin{aligned} \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} &= a_{11}a_{22}a_{33} + a_{12}a_{23}a_{31} + a_{13}a_{21}a_{32} - a_{11}a_{23}a_{32} - a_{12}a_{21}a_{33} - a_{13}a_{22}a_{31} \\ &= a_{11}(a_{22}a_{33} - a_{23}a_{32}) + a_{12}(a_{23}a_{31} - a_{21}a_{33}) + a_{13}(a_{21}a_{32} - a_{22}a_{31}) \\ &= a_{11} \begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} - a_{12} \begin{vmatrix} a_{21} & a_{23} \\ a_{31} & a_{33} \end{vmatrix} + a_{13} \begin{vmatrix} a_{21} & a_{22} \\ a_{31} & a_{32} \end{vmatrix}. \end{aligned} \quad (1)$$

为了解决(1)式中三个二阶行列式与三阶行列式的关系,我们引进余子式和代数余子式的概念.

在三阶行列式

$$D = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}$$

中,把元素 a_{ij} ($i=1,2,3; j=1,2,3$) 所在的第 i 行和第 j 列划去后,留下的元素保持原来相对位置不变组成的二阶行列式称为元素 a_{ij} 的余子式,记作 M_{ij} ;记

$$A_{ij} = (-1)^{i+j} M_{ij},$$

A_{ij} 称为元素 a_{ij} 的代数余子式.一般地,有

定义 在 n 阶行列式中,把 (i, j) 元 a_{ij} ($i, j=1, 2, \dots, n$) 所在的第 i 行第 j 列元素划去后,留下的元素保持原来相对位置不变组成的 $n-1$ 阶行列式称为元素 a_{ij} 的余子式,记作 M_{ij} ;记

$$A_{ij} = (-1)^{i+j} M_{ij},$$

A_{ij} 称为 (i, j) 元 a_{ij} 的代数余子式.

由(1)式可知,对于三阶行列式,有

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = a_{11}A_{11} + a_{12}A_{12} + a_{13}A_{13}.$$

对 n 阶行列式是否也有同样的关系呢?

引理 一个 n 阶行列式, 如果其中第 i 行所有元素中除 (i, j) 元 a_{ij} 外, 其余元素全为 0, 则该行列式等于 a_{ij} 与其代数余子式的乘积, 即

$$D = a_{ij} A_{ij}.$$

证 先证 $(i, j) = (1, 1)$ 的情况, 此时

$$D = \begin{vmatrix} a_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nm} \end{vmatrix}.$$

这是上一节例 7 中当 $k=1$ 的特殊情况, 根据例 7 的结论, 即有

$$D = a_{11} M_{11}.$$

又

$$A_{11} = (-1)^{1+1} M_{11} = M_{11},$$

所以

$$D = a_{11} A_{11}.$$

再证一般情况, 此时

$$D = \begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1j} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & \cdots & a_{ij} & \cdots & 0 \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nj} & \cdots & a_{nm} \end{vmatrix}$$

为了利用前面的结果, 把 D 的行列作如下对换: 把 D 的第 i 行依次与第 $i-1$ 行、第 $i-2$ 行、 $\cdots$ 、第 1 行对换, 这样数 a_{ij} 就调换成 $(1, j)$ 元, 对换的次数为 $i-1$. 再把第 j 列依次与第 $j-1$ 列、第 $j-2$ 列、 $\cdots$ 、第 1 列对换, 这样数 a_{ij} 就调换成 $(1, 1)$ 元, 对换的次数为 $j-1$. 总计, 经过 $i+j-2$ 次对换, 把数 a_{ij} 调换成 $(1, 1)$ 元, 所得行列式 $D_1 = (-1)^{i+j-2} D = (-1)^{i+j} D$, 而 D_1 中 $(1, 1)$ 元的余子式就是 D 中 (i, j) 元的余子式 M_{ij} .

由于 D_1 中 $(1, 1)$ 元为 a_{ij} , 第 1 行其余元素都为 0, 利用前面的结果, 有

$$D_1 = a_{ij} M_{ij},$$

于是

$$D = (-1)^{i+j} D_1 = (-1)^{i+j} a_{ij} M_{ij} = a_{ij} A_{ij}.$$

二、行列式按行(或列)展开定理

定理 行列式等于它的任意一行(列)的各元素与其对应的代数余子式的乘积之和. 即

$$D = a_{i1} A_{i1} + a_{i2} A_{i2} + \cdots + a_{in} A_{in} \quad (i=1, 2, \cdots, n)$$

或

$$D = a_{1j} A_{1j} + a_{2j} A_{2j} + \cdots + a_{nj} A_{nj} \quad (j=1, 2, \cdots, n).$$

证 设 $D = \begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1j} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & & & & \\ a_{i1} & \cdots & a_{ij} & \cdots & a_{in} \\ \vdots & & & & \\ a_{n1} & \cdots & a_{nj} & \cdots & a_{nm} \end{vmatrix}$, 根据行列式性质 5, 可得

$$D = \begin{vmatrix} & a_{11} & & a_{12} & \cdots & & a_{1n} \\ & \vdots & & \vdots & & & \vdots \\ a_{i1} + 0 + \cdots + 0 & 0 + a_{i2} + \cdots + 0 & \cdots & 0 + \cdots + 0 + a_{in} \\ & \vdots & & \vdots & & & \vdots \\ & a_{n1} & & a_{n2} & \cdots & & a_{nm} \end{vmatrix}$$

$$= \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{i1} & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nm} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & a_{i2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nm} \end{vmatrix} + \cdots + \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & a_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nm} \end{vmatrix},$$

根据引理, 即得

$$D = a_{i1}A_{i1} + a_{i2}A_{i2} + \cdots + a_{in}A_{in} \quad (i=1, 2, \cdots, n).$$

类似地, 若按列证明, 有

$$D = a_{1j}A_{1j} + a_{2j}A_{2j} + \cdots + a_{nj}A_{nj} \quad (j=1, 2, \cdots, n).$$

这个定理称为行列式按行(列)展开定理. 利用这一法则并结合使用行列式的性质, 可以简化行列式的计算.

例 1 计算 4 阶行列式

$$D = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 2 & 1 \\ 2 & 3 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 3 \\ -1 & 0 & 2 & 1 \end{vmatrix}.$$

解 注意到行列式 D 的第 2 列元素除 $(2, 2)$ 元外, 其余元素都是 0, 可按第 2 列展开:

$$D = 3 \times (-1)^{2+2} \begin{vmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 1 & -1 & 3 \\ -1 & 2 & 1 \end{vmatrix} = 3 \times \begin{vmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 1 & -1 & 3 \\ -1 & 2 & 1 \end{vmatrix},$$

降阶为 3 阶行列式. 对于得到的 3 阶行列式, 进行运算 $r_1 + r_3, r_2 + r_3$, 使其第 1 列元素除 $(3, 1)$ 元外, 其余元素都是 0, 可按第 1 列展开, 降阶为 2 阶行列式, 即可求值, 即

$$D \xrightarrow[r_2+r_3]{r_1+r_3} 3 \times \begin{vmatrix} 0 & 4 & 2 \\ 0 & 1 & 4 \\ -1 & 2 & 1 \end{vmatrix} = 3 \times (-1) \times (-1)^{3+1} \begin{vmatrix} 4 & 2 \\ 1 & 4 \end{vmatrix} = -3 \times 14 = -42.$$

利用行列式按某一行(列)展开定理, 将高阶行列式降为低阶行列式的计算行列式方法称为降阶法. 降阶时应注意按零元素较多的行(列)展开, 或者先利用性质 6 将某一行(列)除一个元素不为零外, 其余元素都化为零后, 按该行(列)展开即可降阶, 从而简化行

列式计算.

例 2 计算 2 021 阶行列式

$$D = \begin{vmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 2\ 020 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & -1 \end{vmatrix}.$$

解 行列式 D 按最后一列展开, 得

$$D = (-1) \times (-1)^{(2\ 021 + 2\ 021)} \begin{vmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ 2\ 020 & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{vmatrix},$$

由于 n 阶次对角线行列式的值等于其次对角线上的元素的乘积, 其符号为 $(-1)^{\frac{n(n-1)}{2}}$ (参看 § 1.2 例 2), 于是, 有

$$D = (-1) \times (-1)^{\frac{2\ 020(2\ 020-1)}{2}} 2\ 020 = -2\ 020.$$

例 3 证明 n 阶范德蒙(Vandermonde)行列式

$$D_n = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \\ x_1 & x_2 & x_3 & \cdots & x_n \\ x_1^2 & x_2^2 & x_3^2 & \cdots & x_n^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_1^{n-2} & x_2^{n-2} & x_3^{n-2} & \cdots & x_n^{n-2} \\ x_1^{n-1} & x_2^{n-1} & x_3^{n-1} & \cdots & x_n^{n-1} \end{vmatrix} = \prod_{1 \leqslant j < i \leqslant n} (x_i - x_j).$$

证 用数学归纳法证明.

当 $n=2$ 时, 有

$$D_2 = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ x_1 & x_2 \end{vmatrix} = x_2 - x_1 = \prod_{1 \leqslant j < i \leqslant 2} (x_i - x_j).$$

可见, $n=2$ 时, 结论成立.

现假设对于 $n-1$ 阶范德蒙行列式结论成立, 欲证对 n 阶范德蒙行列式结论也成立.

为此, 对 n 阶范德蒙行列式 D_n 作如下计算: $r_n + (-x_1)r_{n-1}, r_{n-1} + (-x_1)r_{n-2}, \dots, r_2 + (-x_1)r_1$, 即从第 n 行开始, 后行加上前一行的一 x_1 倍, 有

$$D_n = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \\ 0 & x_2 - x_1 & x_3 - x_1 & \cdots & x_n - x_1 \\ 0 & x_2(x_2 - x_1) & x_3(x_3 - x_1) & \cdots & x_n(x_n - x_1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & x_2^{n-3}(x_2 - x_1) & x_3^{n-3}(x_3 - x_1) & \cdots & x_n^{n-3}(x_n - x_1) \\ 0 & x_2^{n-2}(x_2 - x_1) & x_3^{n-2}(x_3 - x_1) & \cdots & x_n^{n-2}(x_n - x_1) \end{vmatrix},$$

按第 1 列展开,并把每一列的公因子 (x_i-x_1) 提出,就有

$$D_n = (x_2-x_1)(x_3-x_1)\cdots(x_n-x_1) \begin{vmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ x_2 & x_3 & \cdots & x_n \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_2^{n-2} & x_3^{n-2} & \cdots & x_n^{n-2} \end{vmatrix},$$

即

$$D_n = (x_2-x_1)(x_3-x_1)\cdots(x_n-x_1)D_{n-1},$$

其中 D_{n-1} 是一个 $n-1$ 阶范德蒙行列式,按归纳假设,有

$$D_{n-1} = \begin{vmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ x_2 & x_3 & \cdots & x_n \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_2^{n-2} & x_3^{n-2} & \cdots & x_n^{n-2} \end{vmatrix} = \prod_{2 \leq j \leq i \leq n} (x_i - x_j),$$

故上述 n 阶范德蒙行列式

$$D_n = (x_2-x_1)(x_3-x_1)\cdots(x_n-x_1) \prod_{2 \leq j \leq i \leq n} (x_i - x_j) = \prod_{1 \leq j \leq i \leq n} (x_i - x_j).$$

根据数学归纳法,对于一切 $n \geq 2$ 均成立.

由行列式展开定理,还可以得出以下推论.

推论 行列式中,任一行(列)的各元素与另一行(列)相应元素的代数余子式的乘积之和等于零.即

$$a_{i1}A_{j1} + a_{i2}A_{j2} + \cdots + a_{in}A_{jn} = 0 (i \neq j),$$

或

$$a_{1i}A_{1j} + a_{2i}A_{2j} + \cdots + a_{ni}A_{nj} = 0 (i \neq j).$$

证 把 n 阶行列式

$$D = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \cdots & a_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{j1} & a_{j2} & \cdots & a_{jn} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix} \begin{matrix} \\ \\ \text{(第 } i \text{ 行)} \\ \\ \text{(第 } j \text{ 行)} \\ \\ \end{matrix}$$

中第 j 行元素 a_{jk} 换成 a_{ik} ($k=1,2,\cdots,n$),得

$$D_1 = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \cdots & a_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \cdots & a_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix} \begin{matrix} \\ \\ \text{(第 } i \text{ 行)} \\ \\ \text{(第 } j \text{ 行)} \\ \\ \end{matrix}$$

按第 j 行展开,有

$$D_1 = a_{i1}A_{j1} + a_{i2}A_{j2} + \cdots + a_{in}A_{jn}.$$

又当 $i \neq j$ 时, D_1 中有两行对应元素相同, 由性质 2 的推论可知 $D_1 = 0$. 所以有

$$a_{i1}A_{j1} + a_{i2}A_{j2} + \cdots + a_{in}A_{jn} = 0 (i \neq j).$$

类似地, 有

$$a_{1i}A_{1j} + a_{2i}A_{2j} + \cdots + a_{ni}A_{nj} = 0 (i \neq j).$$

综合行列式展开定理及其推论, 行列式有关代数余子式的性质可写为:

$$a_{i1}A_{j1} + a_{i2}A_{j2} + \cdots + a_{in}A_{jn} = \sum_{k=1}^n a_{ik}A_{jk} = \begin{cases} D (i=j), \\ 0 (i \neq j); \end{cases}$$

$$a_{1i}A_{1j} + a_{2i}A_{2j} + \cdots + a_{ni}A_{nj} = \sum_{k=1}^n a_{ki}A_{kj} = \begin{cases} D (i=j), \\ 0 (i \neq j). \end{cases}$$

如果再引用克罗内克符号

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 (i=j), \\ 0 (i \neq j), \end{cases}$$

那么上面两式可简写为

$$\sum_{k=1}^n a_{ik}A_{jk} = \delta_{ij}D; \quad \sum_{k=1}^n a_{ki}A_{kj} = \delta_{ij}D.$$

例 4 计算下列行列式

$$(1) D = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 4 & 8 \\ 1 & 3 & 9 & 27 \\ 1 & 4 & 16 & 64 \end{vmatrix};$$

$$(2) D = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ 2x_1^2-1 & 2x_2^2-1 & 2x_3^2-1 & 2x_4^2-1 \\ 4x_1^3-3x_1 & 4x_2^3-3x_2 & 4x_3^3-3x_3 & 4x_4^3-3x_4 \end{vmatrix}.$$

解 (1) 将 D 转置得 D^T , 为 4 阶范德蒙行列式, 即

$$D^T = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 3 & 4 \\ 1 & 4 & 9 & 16 \\ 1 & 8 & 27 & 64 \end{vmatrix} \\ = (4-3)(4-2)(4-1)(3-2)(3-1)(2-1) = 12,$$

即

$$D = 12.$$

(2) 将 $r_3 + r_1, r_4 + 3r_2$ 后, 就得到 4 阶范德蒙行列式, 即

$$D \xrightarrow[r_4+3r_2]{r_3+r_1} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ 2x_1^2 & 2x_2^2 & 2x_3^2 & 2x_4^2 \\ 4x_1^3 & 4x_2^3 & 4x_3^3 & 4x_4^3 \end{vmatrix}$$

$$= 8 \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ x_1^2 & x_2^2 & x_3^2 & x_4^2 \\ x_1^3 & x_2^3 & x_3^3 & x_4^3 \end{vmatrix} = 8 \prod_{1 \leqslant j < i \leqslant 4} (x_i - x_j).$$

例 5 计算 n 阶行列式

$$D = \begin{vmatrix} a & b & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & a & b & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & a & b \\ b & 0 & 0 & \cdots & 0 & a \end{vmatrix}.$$

解 按第 1 列展开, 得

$$D = a(-1)^{1+1} \begin{vmatrix} a & b & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & a & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & a & b \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & a \end{vmatrix} + b(-1)^{n+1} \begin{vmatrix} b & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ a & b & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & b & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & a & b \end{vmatrix},$$

注意到余子式 M_{11} 与 M_{n1} 分别是上、下三角形行列式, 所以

$$D = a \cdot a^{n-1} + (-1)^{n+1} \cdot b \cdot b^{n-1} = a^n + (-1)^{n+1} b^n.$$

例 6 已知 5 阶行列式

$$D = \begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 2 & 2 & 2 & 1 & 1 \\ 3 & 1 & 2 & 4 & 5 \\ 1 & 1 & 1 & 2 & 2 \\ 4 & 3 & 1 & 5 & 0 \end{vmatrix} = 27,$$

求 $A_{41} + A_{42} + A_{43}$ 和 $A_{44} + A_{45}$ 的值. 其中 A_{4j} 是元素 a_{4j} ($j=1, 2, 3, 4, 5$) 的余子式.

解 根据行列式展开定理及其推论

$$a_{i1}A_{j1} + a_{i2}A_{j2} + \cdots + a_{in}A_{jn} = \sum_{k=1}^n a_{ik}A_{jk} = \begin{cases} D(i=j), \\ 0(i \neq j), \end{cases}$$

可得

$$\begin{cases} A_{41} + A_{42} + A_{43} + 2A_{44} + 2A_{45} = 27, \\ 2(A_{41} + A_{42} + A_{43}) + A_{44} + A_{45} = 0, \end{cases}$$

由这个方程组解得

$$A_{41} + A_{42} + A_{43} = -9, A_{44} + A_{45} = 18.$$

例 7 设 $D_1 = \begin{vmatrix} x & 0 & x^2 \\ 1 & 2 & 0 \\ \sin x & 0 & 2 \end{vmatrix}$, $D_2 = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 + \sin x & \cos x & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{vmatrix}$, 求极限 $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{D_1}{D_2}$.

解 $D_1 = 2 \begin{vmatrix} x & x^2 \\ \sin x & 2 \end{vmatrix} = 4x - 2x^2 \sin x,$

$$D_2 \stackrel{c_1+c_3}{=} \begin{vmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 2+\sin x & \cos x & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 2 & 1 \\ 2+\sin x & \cos x \end{vmatrix} = 2\cos x - \sin x - 2,$$

所求极限为 $\frac{0}{0}$ 型未定式, 由洛必达法则, 有

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{D_1}{D_2} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{4x - 2x^2 \sin x}{2\cos x - \sin x - 2} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{4 - 4x \sin x - 2x^2 \cos x}{-2\sin x - \cos x} = -4.$$

习题 1.4

1. 求行列式 $D = \begin{vmatrix} a & 1 & 2 & 3 \\ b & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 2 & 3 \\ d & 1 & -1 & -2 \end{vmatrix}$ 第一列元素的代数余子式 $A_{11}, A_{21}, A_{31}, A_{41}$.

并验证 $\sum_{i=1}^4 a_{i2} A_{i1} = 0$.

2. 用按行(列)展开的方法计算以下行列式:

$$\begin{aligned} (1) \quad & \begin{vmatrix} 2 & 1 & -5 & 1 \\ 1 & -3 & 0 & -6 \\ 0 & 2 & -1 & 2 \\ 1 & 4 & -7 & 6 \end{vmatrix}; & (2) \quad & \begin{vmatrix} 0 & 1 & 3 & -2 \\ 1 & 0 & -2 & 1 \\ 3 & -2 & 7 & 2 \\ -2 & 1 & 2 & 4 \end{vmatrix}; \\ (3) \quad & \begin{vmatrix} 1 & 0 & a & 1 \\ 0 & -1 & b & -1 \\ -1 & -1 & c & 1 \\ -1 & 1 & d & 0 \end{vmatrix}; & (4) \quad & \begin{vmatrix} a-1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & a+1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a-2 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & a+2 \end{vmatrix}. \end{aligned}$$

3. 解方程: $\begin{vmatrix} x-2 & 1 & 0 \\ 1 & x-2 & 1 \\ 0 & 0 & x-2 \end{vmatrix} = 0.$

4. 已知行列式 $D = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & x & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ 3 & x & x & x \end{vmatrix} = 12$, 求 x 的值.

5. 证明下列等式:

$$(1) \quad \begin{vmatrix} y & x & x \\ x & y & x \\ x & x & y \end{vmatrix} = (2x+y)(x-y)^2; \quad (2) \quad \begin{vmatrix} 1 & a & a^2-bc \\ 1 & b & b^2-ca \\ 1 & c & c^2-ab \end{vmatrix} = 0;$$

$$(3) \begin{vmatrix} c & a & d & b \\ a & c & d & b \\ a & c & b & d \\ c & a & b & d \end{vmatrix} = 0; \quad (4) \begin{vmatrix} a^2 & (a+1)^2 & (a+2)^2 & (a+3)^2 \\ b^2 & (b+1)^2 & (b+2)^2 & (b+3)^2 \\ c^2 & (c+1)^2 & (c+2)^2 & (c+3)^2 \\ d^2 & (d+1)^2 & (d+2)^2 & (d+3)^2 \end{vmatrix} = 0;$$

$$(5) \begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1k} & c_{11} & \cdots & c_{1r} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{k1} & \cdots & a_{kk} & c_{k1} & \cdots & c_{kr} \\ 0 & \cdots & 0 & b_{11} & \cdots & b_{1r} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & \cdots & 0 & b_{r1} & \cdots & b_{rr} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1k} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{k1} & \cdots & a_{kk} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} b_{11} & \cdots & b_{1r} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ b_{r1} & \cdots & b_{rr} \end{vmatrix};$$

$$(6) \begin{vmatrix} x & -1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & x & -1 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & x & -1 \\ a_n & a_{n-1} & a_{n-2} & \cdots & a_2 & a_1 + x \end{vmatrix} = x^n + a_1 x^{n-1} + \cdots + a_{n-1} x + a_n (n \geq 2).$$

$$6. \text{ 若存在常数 } k_1, k_2, \text{ 使 } \begin{cases} a_{11} = k_1 a_{21} + k_2 a_{31}, \\ a_{12} = k_1 a_{22} + k_2 a_{32}, \\ a_{13} = k_1 a_{23} + k_2 a_{33}, \end{cases} \text{ 求证 } \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = 0.$$

§ 1.5 克拉默法则

作为 n 阶行列式的应用, 下面用 n 阶行列式来求解含有 n 个未知量 n 个方程的线性方程组.

设含有 n 个未知量 n 个方程的线性方程组

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1n}x_n = b_1, \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2n}x_n = b_2, \\ \cdots \cdots \cdots \\ a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \cdots + a_{nn}x_n = b_n, \end{cases} \quad (1)$$

类似于二元、三元线性方程组, 它的解可以用 n 阶行列式表示, 即有

克拉默法则, 亦称**克莱姆法则**.

如果线性方程组(1)的系数行列式 D 不等于零, 即

$$D = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix} \neq 0,$$

那么方程组(1)存在唯一解

$$x_1 = \frac{D_1}{D}, x_2 = \frac{D_2}{D}, \dots, x_n = \frac{D_n}{D},$$

其中 $D_j (j=1, 2, \dots, n)$ 是把系数行列式 D 中第 j 列元素用方程组右端的常数项列代替所得到的 n 阶行列式, 即

$$D_j = \begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1,j-1} & b_1 & a_{1,j+1} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & \cdots & a_{2,j-1} & b_2 & a_{2,j+1} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{n,j-1} & b_n & a_{n,j+1} & \cdots & a_{nm} \end{vmatrix}.$$

这个法则的证明将在第 2 章给出.

例 1 解线性方程组

$$\begin{cases} x_1 - x_2 + x_3 + 2x_4 = 1, \\ x_1 + x_2 - 2x_3 + x_4 = 1, \\ x_1 + x_2 + x_4 = 2, \\ x_1 + x_3 - x_4 = 1. \end{cases}$$

解 系数行列式

$$D = \begin{vmatrix} 1 & -1 & 1 & 2 \\ 1 & 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & -1 \end{vmatrix} = -10 \neq 0,$$

根据克拉默法则, 此方程组有唯一解. 又

$$\begin{aligned} D_1 &= \begin{vmatrix} 1 & -1 & 1 & 2 \\ 1 & 1 & -2 & 1 \\ 2 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & -1 \end{vmatrix} = -8, & D_2 &= \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 2 \\ 1 & 1 & -2 & 1 \\ 1 & 2 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 \end{vmatrix} = -9, \\ D_3 &= \begin{vmatrix} 1 & -1 & 1 & 2 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & -1 \end{vmatrix} = -5, & D_4 &= \begin{vmatrix} 1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 2 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \end{vmatrix} = -3, \end{aligned}$$

所以此方程组的解为

$$x_1 = \frac{-8}{-10} = \frac{4}{5}, x_2 = \frac{9}{10}, x_3 = \frac{-5}{-10} = \frac{1}{2}, x_4 = \frac{3}{10}.$$

例 2 解线性方程组

$$\begin{cases} ax_1 + bx_2 + \cdots + bx_n = 1, \\ bx_1 + ax_2 + \cdots + bx_n = 1, \\ \dots\dots\dots \\ bx_1 + bx_2 + \cdots + ax_n = 1, \end{cases}$$

其中 $(a-b)[a+(n-1)b] \neq 0$.

解 系数行列式

$$D = \begin{vmatrix} a & b & \cdots & b \\ b & a & \cdots & b \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b & b & \cdots & a \end{vmatrix} = [a + (n-1)b] \begin{vmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ b & a & \cdots & b \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b & b & \cdots & a \end{vmatrix}$$

$$= [a + (n-1)b] \begin{vmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ 0 & a-b & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & a-b \end{vmatrix} = (a-b)^{n-1} [a + (n-1)b].$$

由于 $(a-b)[a + (n-1)b] \neq 0$, 故 $D \neq 0$, 所以方程组有唯一解. 又因为

$$D_1 = \begin{vmatrix} 1 & b & \cdots & b \\ 1 & a & \cdots & b \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & b & \cdots & a \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & a-b & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & 0 & \cdots & a-b \end{vmatrix} = (a-b)^{n-1},$$

同理可得

$$D_2 = D_3 = \cdots = D_n = (a-b)^{n-1}.$$

故线性方程组的解为

$$x_j = \frac{D_j}{D} = \frac{1}{a + (n-1)b} (j=1, 2, \cdots, n).$$

用克拉默法则解线性方程组有两个条件必须满足:

- (1) 方程个数与未知量个数相等;
- (2) 系数行列式 $D \neq 0$.

当方程组(1)右端的常数项 $b_1, b_2, \cdots, b_n$ 全为零时, 则

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1n}x_n = 0, \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2n}x_n = 0, \\ \cdots \cdots \\ a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \cdots + a_{nn}x_n = 0 \end{cases} \quad (2)$$

称为齐次线性方程组, 否则称为非齐次线性方程组.

$x_1 = x_2 = \cdots = x_n = 0$ 显然是齐次线性方程组(2)的解, 称为齐次线性方程组(2)的零解. 如果齐次线性方程组(2)除了零解外, 还有不全为零的解 $x_1, x_2, \cdots, x_n$, 称为齐次线性方程组(2)的非零解.

根据克拉默法则, 不难得到如下结论.

推论 1 如果齐次线性方程组(2)的系数行列式 $D \neq 0$, 则它只有唯一零解.

由此可知, $D=0$ 是齐次线性方程组(2)有非零解的必要条件, 后面还可以证明这个条件也是充分的. 于是有

推论 2 齐次线性方程组(2)有非零解的充要条件为系数行列式 D 为零.

例 3 问 λ 取何值时, 齐次线性方程组

$$\begin{cases} \lambda x_1 + x_2 + x_3 = 0, \\ x_1 + \lambda x_2 - x_3 = 0, \\ 2x_1 - x_2 + x_3 = 0 \end{cases}$$

有非零解?

解 已知方程组的系数行列式

$$D = \begin{vmatrix} \lambda & 1 & 1 \\ 1 & \lambda & -1 \\ 2 & -1 & 1 \end{vmatrix} \xrightarrow[c_2+c_3]{c_1+(-2)c_3} \begin{vmatrix} \lambda-2 & 2 & 1 \\ 3 & \lambda-1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = \lambda^2 - 3\lambda - 4.$$

令 $\lambda^2 - 3\lambda - 4 = 0$, 解得 $\lambda = -1$ 或 $\lambda = 4$. 即当 $\lambda = -1$ 或 $\lambda = 4$ 时, 系数行列式 $D = 0$, 原方程组有非零解.

例 4 解齐次线性方程组

$$\begin{cases} x_1 + x_2 + x_3 + 2x_4 = 0, \\ x_1 - x_2 + x_3 + x_4 = 0, \\ x_1 + x_2 + 2x_3 + x_4 = 0, \\ x_1 + x_2 - x_3 + 2x_4 = 0. \end{cases}$$

解 因为方程组的系数行列式

$$D = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 2 \\ 1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 2 \end{vmatrix} \xrightarrow[r_4-r_1]{r_2-r_1, r_3-r_1} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 2 \\ 0 & -2 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & -2 & 0 \end{vmatrix} \xrightarrow{r_4+2r_3} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 2 \\ 0 & -2 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -2 \end{vmatrix} = 4 \neq 0,$$

根据推论 1, 原齐次线性方程组只有零解.

习题 1.5

1. 利用克拉默法则解下列方程组:

$$(1) \begin{cases} 2x_1 + x_2 - x_3 = 3, \\ x_1 + x_2 + x_3 = 1, \\ x_1 - 2x_2 - 3x_3 = 4; \end{cases}$$

$$(2) \begin{cases} x_1 + x_2 + x_3 = 6, \\ 3x_1 + 2x_2 - x_3 = 4, \\ 5x_1 - x_2 + 3x_3 = 12; \end{cases}$$

$$(3) \begin{cases} x_1 - x_2 + x_3 - 2x_4 = 2, \\ 2x_1 - x_3 + 4x_4 = 4, \\ 3x_1 + 2x_2 + x_3 = -1, \\ -x_1 + 2x_2 - x_3 + 2x_4 = -4; \end{cases}$$

$$(4) \begin{cases} x_1 + x_2 + 2x_3 + 3x_4 = 1, \\ 3x_1 + x_2 - x_3 - 2x_4 = -4, \\ 2x_1 - 3x_2 - x_3 - x_4 = -6, \\ x_1 + 2x_2 + 3x_3 - x_4 = -4. \end{cases}$$

2. 问 k 取何值时, 齐次线性方程组 $\begin{cases} 2x_1 - x_2 + 3x_3 = 0, \\ x_1 - 3x_2 + 4x_3 = 0, \\ -x_1 + 2x_2 + kx_3 = 0, \end{cases}$ (1) 只有零解; (2) 有非

零解?

3. 设 a, b, c, d 是互不相等的实数, 证明: 方程组

$$\begin{cases} x_1 + x_2 + x_3 + x_4 = 0, \\ ax_1 + bx_2 + cx_3 + dx_4 = 0, \\ a^2x_1 + b^2x_2 + c^2x_3 + d^2x_4 = 0, \\ a^3x_1 + b^3x_2 + c^3x_3 + d^3x_4 = 0 \end{cases}$$

只有零解.

复习题一

1. 单项选择题:

(1) $\begin{vmatrix} 1 & 4 & 7 \\ 2 & 5 & 8 \\ 3 & 6 & 9 \end{vmatrix} = (\quad).$

A. $3!$

B. $9!$

C. 0

D. 252

(2) 若 $\begin{vmatrix} 1 & 2 & 5 \\ 1 & 3 & -2 \\ 2 & 5 & x \end{vmatrix} = 0$, 则 $x = (\quad).$

A. 2

B. 3

C. -2

D. -3

(3) 下列行列式中不等于零的有().

A. 行列式 D 中有两行对应元素成比例

B. 行列式 D 中有一行的元素全为零

C. 行列式 D 满足 $3D - 2D^T = 2D + 1$

D. 行列式 D 中有两行对应元素之和均为零

(4) $\begin{vmatrix} a & b & c \\ a^2 & b^2 & c^2 \\ a^3 & b^3 & c^3 \end{vmatrix} = (\quad).$

A. $abc(b-a)(c-a)(c-b)$

B. $abc(b-a)(c-a)(b-c)$

C. $abc(a-b)(c-a)(c-b)$

D. $abc(b-a)(a-c)(c-b)$

(5) 行列式 $D = \begin{vmatrix} k & 2 & 1 \\ 2 & k & 0 \\ 1 & -1 & 1 \end{vmatrix} = 0$ 的充分必要条件是().

A. $k=0$

B. $k=3$

C. $k=2$

D. $k=1$

(6) $\begin{vmatrix} x & 0 & 0 & y \\ 0 & x & y & 0 \\ 0 & y & x & 0 \\ y & 0 & 0 & x \end{vmatrix} = (\quad).$

A. $x^4 + y^4$

B. $x^4 - y^4$

C. $(x^2 + y^2)^2$

D. $(x^2 - y^2)^2$

$$(7) \text{行列式} \begin{vmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 2 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 8 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 9 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 10 \end{vmatrix} = (\quad).$$

A. 50

B. $-10!$ C. $10!$ D. $9!$

$$(8) \text{行列式} \begin{vmatrix} 0 & a_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & a_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & a_{n-1} \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix} = (\quad).$$

A. $a_1 a_2 \cdots a_{n-1} a_{nn}$ B. $-a_1 a_2 \cdots a_{n-1} a_{nn}$ C. $(-1)^n a_1 a_2 \cdots a_{n-1} a_{nn}$ D. $(-1)^{n+1} a_1 a_2 \cdots a_{n-1} a_{nn}$

$$(9) \text{当 } \lambda = (\quad), \text{ 齐次线性方程组 } \begin{cases} \lambda x_1 + x_2 + x_3 = 0, \\ x_1 + \lambda x_2 + x_3 = 0, \\ x_1 + x_2 + \lambda x_3 = 0 \end{cases} \text{ 有非零解.}$$

A. -1 B. 1 C. 2 D. 0

(10) 下列方程组中, 只有零解的齐次线性方程组是().

$$\text{A. } \begin{cases} x_1 + 2x_2 + 3x_3 = 0 \\ -2x_1 + x_2 + x_3 = 0 \\ -x_1 + 3x_2 + 4x_3 = 0 \end{cases}$$

$$\text{B. } \begin{cases} 2x_1 + 3x_2 - x_3 = 0 \\ -x_1 + 2x_2 + x_3 = 0 \\ -x_1 + 9x_2 + 2x_3 = 0 \end{cases}$$

$$\text{C. } \begin{cases} x_1 + x_2 + x_3 = 0 \\ -x_1 + 2x_2 + x_3 = 0 \\ x_1 - x_2 + 2x_3 = 0 \end{cases}$$

$$\text{D. } \begin{cases} x_1 - x_2 + 2x_3 = 0 \\ 2x_1 - 2x_2 - x_3 = 0 \\ -x_1 + x_2 - 7x_3 = 0 \end{cases}$$

2. 填空题:

(1) 三阶行列式 $D_1 = 6$, 将 D_1 第 3 行的各元素乘 2 后加到第 1 行对应元素上去, 得新行列式 $D_2 =$ _____;

$$(2) \begin{vmatrix} 2 & 1 & 5 \\ -8 & -3 & -21 \\ -1 & 0 & -9 \end{vmatrix} = \text{_____};$$

(3) 四阶行列式第 3 行的元素分别是 $-6, 1, 3, 4$, 对应的余子式分别为 $2, -2, 8, 5$, 则行列式 $D =$ _____;

$$(4) \text{行列式} \begin{vmatrix} x & a & a & a \\ a & x & a & a \\ a & a & x & a \\ a & a & a & x \end{vmatrix} = \text{_____};$$

(5) 行列式 $\begin{vmatrix} x & y & x+y \\ y & x+y & x \\ x+y & x & y \end{vmatrix} = \underline{\hspace{2cm}};$

(6) 若行列式 $D = \begin{vmatrix} k & 2 & 3 \\ -1 & k & 0 \\ 0 & k & 1 \end{vmatrix} = 0$, 则 $k = \underline{\hspace{2cm}};$

(7) 行列式 $\begin{vmatrix} 0 & a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b \\ c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & d & 0 \end{vmatrix} = \underline{\hspace{2cm}};$

(8) 若 $\begin{vmatrix} a & b & c & d \\ 0 & a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ 0 & a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ 0 & a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = 1$, 则 $\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = \underline{\hspace{2cm}};$

(9) 设行列式 $D = \begin{vmatrix} 1 & -5 & 1 & 3 \\ 1 & 1 & 3 & 4 \\ 1 & 1 & 2 & 3 \\ 2 & 2 & 3 & 4 \end{vmatrix}$, 则 $A_{41} + A_{42} + A_{43} + A_{44} = \underline{\hspace{2cm}};$

(10) 已知方程组 $\begin{cases} x_1 + x_2 + ax_3 = 0, \\ x_1 + ax_2 + x_3 = 0, \\ x_1 + 2x_2 + 2x_3 = 0 \end{cases}$ 有非零解, 则 $a = \underline{\hspace{2cm}}.$

3. 计算下列行列式:

(1) $\begin{vmatrix} 1+a_1 & 1 & 1 \\ 1 & 1+a_2 & 1 \\ 1 & 1 & 1+a_3 \end{vmatrix} \quad (a_1 a_2 a_3 \neq 0);$

(2) $\begin{vmatrix} a^2 & (a+1)^2 & (a+2)^2 & (a+3)^2 \\ b^2 & (b+1)^2 & (b+2)^2 & (b+3)^2 \\ c^2 & (c+1)^2 & (c+2)^2 & (c+3)^2 \\ d^2 & (d+1)^2 & (d+2)^2 & (d+3)^2 \end{vmatrix};$

(3) $\begin{vmatrix} 1 & 4 & 4 & 4 & 4 \\ 4 & 2 & 4 & 4 & 4 \\ 4 & 4 & 3 & 4 & 4 \\ 4 & 4 & 4 & 4 & 4 \\ 4 & 4 & 4 & 4 & 5 \end{vmatrix};$

(4) $\begin{vmatrix} 1 & a & b & c & d \\ a & 1 & 0 & 0 & 0 \\ b & 0 & 1 & 0 & 0 \\ c & 0 & 0 & 1 & 0 \\ d & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}.$

4. 计算 n 阶行列式:

$$(1) \begin{vmatrix} a+x_1 & a & \cdots & a \\ a & a+x_2 & \cdots & a \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a & a & \cdots & a+x_n \end{vmatrix}; \quad (2) \begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 \\ 1 & 0 & x & \cdots & x & x \\ 1 & x & 0 & \cdots & x & x \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 1 & x & x & \cdots & 0 & x \\ 1 & x & x & \cdots & x & 0 \end{vmatrix}.$$

5. 判别下列方程组是否有解. 若有解, 求出其解.

$$(1) \begin{cases} x_1+x_2+x_3+x_4=5, \\ x_1+2x_2-x_3+4x_4=-2, \\ 2x_1-3x_2-x_3-5x_4=-2, \\ 3x_1+x_2+2x_3+11x_4=0; \end{cases} \quad (2) \begin{cases} 2x_1-x_2+3x_3+2x_4=6, \\ 3x_1-3x_2+3x_3+2x_4=5, \\ 3x_1-x_2-x_3+2x_4=3, \\ 3x_1-x_2+3x_3-x_4=4. \end{cases}$$

$$6. \text{ 设方程组 } \begin{cases} x+y+z=a+b+c, \\ ax+by+cz=a^2+b^2+c^2, \\ bcx+cay+baz=3abc, \end{cases}$$

试问: a, b, c 满足什么条件时, 方程组有唯一解? 并求出唯一解.

7. 当 λ 取何值时, 下列齐次线性方程组有非零解?

$$(1) \begin{cases} \lambda x_1+x_2+2x_3=0, \\ x_1+\lambda x_2+x_3=0, \\ x_1+x_2+\lambda x_3=0; \end{cases} \quad (2) \begin{cases} (1-\lambda)x_1-2x_2+4x_3=0, \\ 2x_1+(3-\lambda)x_2+x_3=0, \\ x_1+x_2+(1-\lambda)x_3=0. \end{cases}$$