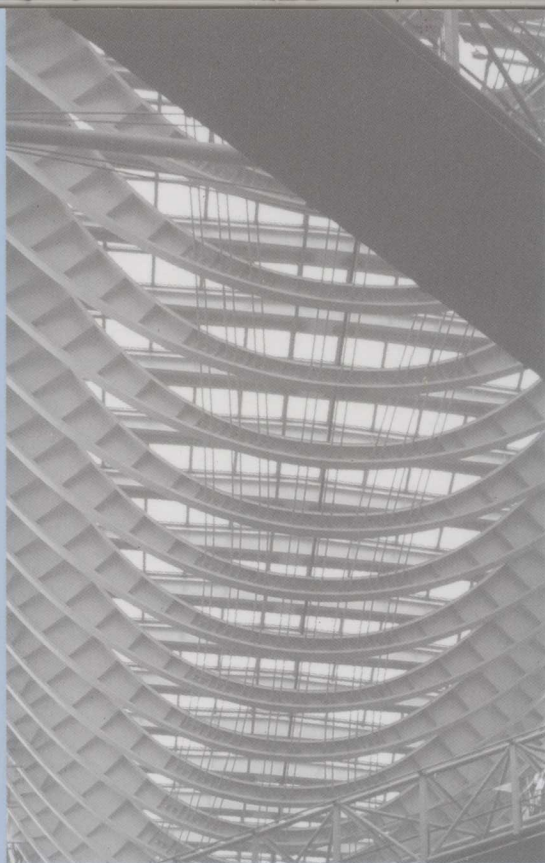




■ 高等学校教材

简明线性代数

(第二版)

主编 欧阳克智 李富民



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

· 高等学校教材

简明线性代数

Jianming Xianxing Daishu

(第二版)

主编 欧阳克智 李富民
编者 李富民 高军安 燕列雅
李艳丽 李选民 欧阳克智



高等教育出版社 · 北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容简介

本书是根据近年来高校扩招后普通高校的实际情况以及最新修订的“工科类本科数学基础课程教学基本要求”编写而成的,突出简明实用、易教易学的特点。在内容选材上,以必需、够用为原则;在编排上,采取一些新的推理次序及结构体系,力求做到内容由浅入深,循序渐进;叙述论证上条理清楚,重点突出,概念讲解详尽,推理简洁明了。另外,在保持系统性和科学性的前提下,适当弱化了严格抽象的理论推导,代之以直观扼要的说明或例证,淡化解题技巧,侧重学生基本能力的培养。

本书内容包括:行列式、矩阵、 n 维向量与向量空间、线性方程组、矩阵的相似对角化、二次型,其中带“*”号的内容还可供不同教学需要,灵活选择。

本书可作为普通高等学校非数学类专业的线性代数课程教材,还可供师范类、成人教育类相关专业的师生使用。

图书在版编目(CIP)数据

简明线性代数/欧阳克智,李富民主编.—2版.—北京:高等教育出版社,2010.1

ISBN 978-7-04-028325-9

I. 简… II. ①欧…②李… III. 线性代数—高等学校—教材 IV. O151.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 220678 号

策划编辑 张长虹 责任编辑 李 陶 封面设计 王凌波
责任绘图 杜晓丹 版式设计 张 岚 责任校对 王 超
责任印制 张泽业

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
总 机 010-58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京市文林印务有限公司

开 本 787×960 1/16
印 张 11
字 数 200 000

购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2004 年 4 月第 1 版
2010 年 1 月第 2 版
印 次 2010 年 1 月第 1 次印刷
定 价 12.50 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 28325-00

第二版前言

本书自 2004 年出版以来,几年的教学实践,证明本书是比较适合扩招后的普通高等院校学生的实际水平的。读者普遍反映,本书简明实用,易教易学。同时,也有读者对本书提出了宝贵的意见和建议,因此,我们感到有必要对本书进一步锤炼修订。

这次修订,我们的原则是不做大的改动,依据教育部高等学校数学与统计学教学指导委员会最新修订的全国“工科类、经管类本科数学基础课程教学基本要求”,进一步删繁就简,化难为易。删去了一些较困难且不必要的论证和内容,比如矩阵的三秩合一定理的证明,线性变换的一些内容等;改变了某些章节的讲法,比如“向量组的秩”一节的推理次序,用特征值的几何重数与代数重数论述方阵的可对角化的条件等。

为了帮助学生抓住学习要点,深入理解所学内容。这次修订,我们在每一章最后增加了一个本章小结,小结对本章重要内容进行了归纳总结,告诉学生应掌握的基本知识点,同时又对某些内容在概念及方法上作了进一步的阐述与深化。

此外,我们对一些文字和叙述作了修改,使之更确切、更顺畅。我们也改正了一些小错误。对于例题与习题作了一些调整,增加了一些新题型。

这次修订工作,主要由欧阳克智教授及李富民教授策划、执笔修订;高军安、李艳丽和李选民也参与了修订。我们希望通过这次修订,使本书的质量有明显提高。限于水平,书中肯定还会有不少不足之处,衷心希望读者批评指正。

这次修订得到了高等教育出版社的大力支持,特别是数学策划编辑张长虹同志的热情帮助、责任编辑李陶同志的认真编校,对此,我们均表示衷心的感谢。

编 者

2009 年 7 月

第一版前言

为了适应我国普通高等院校近几年扩招后学生的实际情况,教育部非数学专业数学教学指导委员会于2003年暑期新修订了全国“工科类本科数学课程教学基本要求”。本书就是根据这个新修订的教学基本要求,所编写的一本《线性代数》教材。

本书突出的特点是实用简明、易教易学。在内容选材上,以必需、够用为原则,且符合教学基本要求;在编排处理上,采取了一些新的推理次序及结构体系,尽量做到由浅入深,循序渐进,起点低,坡度小,易自学;在叙述论证上,条理清晰,重点突出,概念讲解详尽,推理简单明了,没有令人费解的冗长证明。在保持该门课程的系统性和科学性的前提下,适当弱化严格抽象的理论推导,有时代之以直观扼要的说明或例证,使学生易于抓住理论推导的基本思路及实质。适当淡化解题技巧的训练,侧重学生基本能力的培养和提高。

本书可作为普通高校理工、经管、师范、成人教育等类(非数学专业)的线性代数课程的教材。讲授全书大约需要40学时左右。书中带“*”号的内容和习题,不作为教学基本要求,可供不同教学需要,灵活选择,或供学有余力的学生自学参考。

本书是在陕西省大学数学教学委员会的积极倡导和组织下,由西安石油大学、西安理工大学、西安建筑科技大学、西安邮电学院、西安工业学院等高校联合编写的。本书由欧阳克智教授主编,并负责修改、统稿、定稿。参加编写的有李富民、高军安、燕列雅、李艳丽、李选民、欧阳克智等同志。

作者对高等教育出版社的大力支持,对高教出版社数学策划编辑王瑜同志的热情帮助,表示最诚挚的谢意。

作者衷心欢迎广大读者对本教材多提宝贵意见,以便进一步修改完善。

编 者

2003年11月20日

目 录

第一章 行列式	1
§1.1 二、三阶行列式	1
§1.2 n 阶行列式的定义	3
§1.3 行列式的展开	7
§1.4 行列式的性质	10
§1.5 行列式的计算举例	13
§1.6 克拉默法则	18
本章小结	20
习题一	21
第二章 矩阵	24
§2.1 矩阵的概念	24
§2.2 矩阵的运算	27
§2.3 可逆矩阵	35
§2.4 分块矩阵	41
§2.5 矩阵的初等变换	48
§2.6 初等矩阵	51
§2.7 矩阵的秩	56
本章小结	61
习题二	63
第三章 n 维向量与向量空间	67
§3.1 n 维向量	67
§3.2 向量组的线性相关性	68
§3.3 向量组的秩	77
§3.4 向量空间的基与维数	85
本章小结	90
习题三	93
第四章 线性方程组	96
§4.1 线性方程组的可解性	96
§4.2 齐次线性方程组解集的结构	99
§4.3 非齐次线性方程组解集的结构	104
本章小结	109
习题四	111

第五章 矩阵的相似对角化	
§ 5.1 矩阵的相似	
§ 5.2 矩阵的特征值与特征向量	
§ 5.3 方阵的相似对角化	
§ 5.4 正交矩阵	
§ 5.5 实对称矩阵的正交相似对角化	
本章小结	
习题五	
第六章 实二次型	
§ 6.1 二次型及其标准形 矩阵的合同	
§ 6.2 化实二次型为标准形	
§ 6.3 实二次型的规范形 * 实对称矩阵的合同规范形	
§ 6.4 正定二次型 正定矩阵	
本章小结	
习题六	
习题参考答案或提示	
参考文献	

第一章 行列式

本章通过解二元和三元一次方程组,引入二阶与三阶行列式的定义,进而给出 n 阶行列式的定义,讨论行列式的性质、行列式的展开及行列式的计算. 最后应用行列式给出求解 n 元线性方程组的克拉默(Cramer)法则.

§ 1.1 二、三阶行列式

考虑二元一次方程组

$$\begin{cases} a_{11}x + a_{12}y = b_1, \\ a_{21}x + a_{22}y = b_2, \end{cases} \quad (1.1)$$

用消元法求解,当 $a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21} \neq 0$ 时,求得解为

$$x = \frac{b_1 a_{22} - a_{12} b_2}{a_{11} a_{22} - a_{12} a_{21}}, y = \frac{b_2 a_{11} - a_{21} b_1}{a_{11} a_{22} - a_{12} a_{21}}. \quad (1.2)$$

式(1.2)的分子与分母都是四个数,分两对相乘再相减而得到的. 例如分母 $a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}$ 是由方程组(1.1)的未知数的四个系数确定的. 为了便于记忆,引入

记号 $\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix}$, 称之为二阶行列式(横排称行,竖排称列),它表示数 $a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}$, 即

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} = a_{11}a_{22} - a_{21}a_{12}. \quad (1.3)$$

如果把 a_{11} 、 a_{22} 的连线称为主对角线,把 a_{12} 、 a_{21} 的连线称为次对角线,则二阶行列式就等于主对角线上元素的乘积,减去次对角线上元素的乘积. 这种算法称为二阶行列式的对角线法则. 按此法则,方程组(1.1)的解(1.2),可用二阶行列式表示为

$$x = \frac{D_1}{D}, \quad y = \frac{D_2}{D}, \quad (1.4)$$

其中

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

这里,行列式 D 称为方程组(1.1)的系数行列式. 行列式 D_1 、 D_2 分别是将 D

的第一列、第二列换为常数项 b_1, b_2 得到的.

为了求解三元一次方程组

$$\begin{cases} a_{11}x + a_{12}y + a_{13}z = b_1, \\ a_{21}x + a_{22}y + a_{23}z = b_2, \\ a_{31}x + a_{32}y + a_{33}z = b_3, \end{cases} \quad (1.5)$$

可引入如下记号: $D = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}$ 表示如下六项的代数和:

$$a_{11}a_{22}a_{33} + a_{12}a_{23}a_{31} + a_{13}a_{21}a_{32} - a_{11}a_{23}a_{32} - a_{12}a_{21}a_{33} - a_{13}a_{22}a_{31}, \quad (1.6)$$

并称

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

为一个三阶行列式. 其中, $a_{ij} (i, j=1, 2, 3)$ 为三阶行列式的第 i 行第 j 列的元素, 且称 i 为行指标, j 为列指标.

为了便于记忆, 我们给出图 1.1, 图中实线上三个元素的乘积组成的三项取正号, 虚线上的三个元素的乘积组成的三项取负号. 这种方法称为三阶行列式的对角线法则.

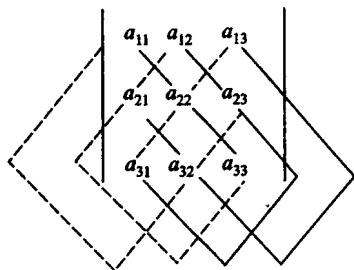


图 1.1 三阶行列式的对角线法则

引入三阶行列式后, 三元一次方程组 (1.5), 当 $D \neq 0$ 时有唯一解

$$x = \frac{D_1}{D}, \quad y = \frac{D_2}{D}, \quad z = \frac{D_3}{D},$$

其中

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

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

称 D 为方程组 (1.5) 的系数行列式. 而行列式 D_1, D_2, D_3 , 简言之, 是将 D 中的第 1, 2, 3 列分别换成常数项 b_1, b_2, b_3 得到的. 这种方法称为三元一次方程组

的行列式解法.

例 1.1 求解线性方程组

$$\begin{cases} x - 2y + z = 12, \\ -2x + y = -7, \\ 3x - 2y + z = 21. \end{cases}$$

解 用行列式方法求解

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

$$D_1 = \begin{vmatrix} 12 & -2 & 1 \\ -7 & 1 & 0 \\ 21 & -2 & 1 \end{vmatrix} = 12 + 14 - 14 - 21 = -9,$$

$$D_2 = \begin{vmatrix} 1 & 12 & 1 \\ -2 & -7 & 0 \\ 3 & 21 & 1 \end{vmatrix} = -7 - 42 + 24 + 21 = -4,$$

$$D_3 = \begin{vmatrix} 1 & -2 & 12 \\ -2 & 1 & -7 \\ 3 & -2 & 21 \end{vmatrix} = 21 + 42 + 48 - 14 - 84 - 36 = -23,$$

所以

$$x = \frac{D_1}{D} = \frac{9}{2}, \quad y = \frac{D_2}{D} = 2, \quad z = \frac{D_3}{D} = \frac{23}{2}.$$

§ 1.2 n 阶行列式的定义

在上一节中,我们引进了二、三阶行列式的概念,得到了求解二元一次方程组及三元一次方程组的行列式解法.该方法使得方程组的求解公式化.那么,对于一般的 n 元一次方程组

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

能否类似地引入 n 阶行列式的概念,从而得到 n 元一次方程组的行列式解法呢?

为此,先介绍排列及逆序数的概念.

一、排列及其逆序数

我们把正整数 $1, 2, \dots, n$ 的每一种有确定次序的排列, 称为一个 n 元排列, 记为 $i_1 i_2 \dots i_n$. 显然, n 元排列一共有 $n!$ 种. 比如 3 元排列有如下 $3! = 6$ 种:

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

在 $n!$ 个 n 元排列中, 只有 $123 \dots n$ 是按数码从小到大的自然顺序组成的一个排列 (称为标准排列), 其余的排列或多或少会出现大的数排在小的数前面的情况. 我们引入

定义 1.1 在一个 n 元排列 $i_1 i_2 \dots i_j \dots i_k \dots i_n$ 中, 如果 $j < k$, 而 $i_j > i_k$, 则称数对 (i_j, i_k) 构成该排列的一个逆序. 一个排列 $i_1 i_2 \dots i_n$ 的逆序总数称为该排列的逆序数, 记为 $\tau(i_1 i_2 \dots i_n)$. 逆序数为偶数的排列称为偶排列, 逆序数为奇数的排列称为奇排列, 标准排列是偶排列.

我们可按以下方法来计算一个排列的逆序数: 先看有多少个数码排在 1 的前面, 设为 m_1 个, 那么就有 m_1 个数码与 1 构成逆序; 然后把 1 划去, 再看有多少个数码排在 2 的前面, 设为 m_2 个, 那么就有 m_2 个数码与 2 构成逆序; 再把 2 划去, $\dots$, 如此继续下去. 这样, 一个 n 元排列的逆序数就等于 $m_1 + m_2 + \dots + m_{n-1}$ (注意 $m_n = 0$).

例 1.2 求 5 元排列 25341 的逆序数.

解 由于 $\tau(25341) = m_1 + m_2 + m_3 + m_4 = 4 + 0 + 1 + 1 = 6$,
故 25341 是一个偶排列.

定义 1.2 将一个排列中某两个数码的位置互换, 而其余数码不动, 称为是一次对换. 将一个排列中的相邻位置的两个数码互换, 而其余数码不动, 称为一次轮换. 轮换是特殊的对换.

定理 1.1 一次对换改变排列的奇偶性.

证 (1) 显然对一个排列 $i_1 \dots i_k i_{k+1} \dots i_n$ 施行一次轮换, 交换 i_k 及 i_{k+1} 的位置, 得到排列 $i_1 \dots i_{k+1} i_k \dots i_n$ 时, 仅改变 i_k 与 i_{k+1} 之间的逆序, 其逆序数或增加 1 或减少 1, 排列的奇偶性改变.

(2) 对于一般的对换, 比如将排列 $\dots k j_1 j_2 \dots j_l \dots$, 经一次对换 (l 与 k 换位), 得到排列 $\dots l j_1 j_2 \dots j_k \dots$, 就可以通过 $2s+1$ 次轮换来实现: 先将 l 与 j_1 轮换, 再与 j_{s-1} 轮换, $\dots$, 与 j_1 轮换, 最后与 k 轮换, 共经 $s+1$ 次轮换, 就可得到排列 $\dots l k j_1 j_2 \dots j_s \dots$, 然后依次把 k 与 $j_1, j_2, \dots, j_s$ 轮换, 共经 s 次轮换, 即可得到排列 $\dots l j_1 j_2 \dots j_s k \dots$. 这说明任一次对换都可通过奇数次轮换来实现. 从而, 一次对换改变排列的奇偶性. $\square$

推论 任何一个 n 元排列都可通过若干次对换变成标准排列, 且所需对换次数, 与该排列的逆序数有着相同的奇偶性.

证 若排列 $i_1 i_2 \cdots i_n$ 是奇排列, 要将其经若干次对换变成标准排列 $12 \cdots n$, 而标准排列是偶排列, 因每次对换改变一次奇偶性, 故将奇排列变成标准排列, 就需经奇数次对换才能实现; 同理, 若排列 $i_1 i_2 \cdots i_n$ 是偶排列, 要将其变成标准排列 $12 \cdots n$, 就需经过偶数次对换才能实现. $\square$

二、 n 阶行列式的定义

为了引入 n 阶行列式的定义, 我们先来观察三阶行列式的特点:

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

$$= a_{11}a_{22}a_{33} + a_{12}a_{23}a_{31} + a_{13}a_{21}a_{32} - a_{11}a_{23}a_{32} - a_{12}a_{21}a_{33} - a_{13}a_{22}a_{31}.$$

可见, 一个三阶行列式是六项的代数和, 其中每一项都是行列式中三个元素的乘积, 且每项中元素的行标都是三个正整数 $1, 2, 3$ 由小到大的排列 123 . 这说明每项中的元素都是来自不同的行; 每项中元素的列标也不同, 这说明每项中的元素都是来自不同的列; 又各项中元素的列标分别为三个自然数 $1, 2, 3$ 的六个不同的 3 元排列 $123, 231, 312, 132, 213, 321$, 而由 $1, 2, 3$ 三个正整数能且仅能构成六个不同的 3 元排列.

三阶行列式是 D 中所有取自不同行不同列的三个元素乘积的代数和, 那么, 对三阶行列式来讲, 各项前面所冠的正负号是否具有一定的规律性呢?

不难发现: 在三阶行列式 D 中, 六项的行标均为标准排列 123 , 冠正号的项其列标构成的排列分别为 $123, 231, 312$, 均为偶排列, 冠负号的项其列标构成的排列分别为 $132, 213, 321$, 均为奇排列. 于是, 应用逆序数的概念, 三阶行列式 D 可表示为

$$D = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = \sum_{j_1 j_2 j_3} (-1)^{\tau(j_1 j_2 j_3)} a_{1j_1} a_{2j_2} a_{3j_3},$$

其中, $j_1 j_2 j_3$ 是一个 3 元排列, $\tau(j_1 j_2 j_3)$ 是排列 $j_1 j_2 j_3$ 的逆序数. $\sum_{j_1 j_2 j_3}$ 表示对所有 3 元排列求和.

据此, 我们引入下述 n 阶行列式的定义.

定义 1.3 设有 n^2 个数, 排成 n 行 n 列的数表

$$\begin{array}{cccc} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{array} \quad (1.7)$$

其中, a_{ij} 是第 i 行第 j 列的元素. 每取由 1 至 n 的一个排列 $j_1 j_2 \cdots j_n$, 做 n 个元素 $a_{1j_1}, a_{2j_2}, \cdots, a_{nj_n}$ 的乘积, 并冠以符号 $(-1)^{\tau(j_1 j_2 \cdots j_n)}$, 得到一项

$$(-1)^{\tau(j_1 j_2 \cdots j_n)} a_{1j_1} a_{2j_2} \cdots a_{nj_n},$$

这样的项共有 $n!$ 个. 称这 $n!$ 项的和为与表 (1.7) 相对应的 n 阶行列式, 记为

$$D = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix} = \sum_{j_1 j_2 \cdots j_n} (-1)^{\tau(j_1 j_2 \cdots j_n)} a_{1j_1} a_{2j_2} \cdots a_{nj_n}, \quad (1.8)$$

其中, $\sum_{j_1 j_2 \cdots j_n}$ 表示对所有的 n 元排列求和. 通常, 我们又称上式右端为行列式 D 的展开式. 有时, 也将这个行列式记为 $\Delta(a_{ij})$.

注意 当 $n=1$ 时, (1.7) 是一个数 a 构成的数表, 且 (1.8) 式右端只有一项为 a , 因此规定: 由一个数 a 构成的一阶行列式就是其本身, 即行列式 $|a| = a$.

例 1.3 计算四阶行列式

$$D = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ 0 & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ 0 & 0 & a_{33} & a_{34} \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} \end{vmatrix}.$$

解 四阶行列式应有 $4! = 24$ 项, 在每项 $a_{1j_1} a_{2j_2} a_{3j_3} a_{4j_4}$ 中, 只要有一个元素等于零, 乘积就是零. 由于第 4 行中的元素除了 a_{44} 外都是 0, 故只需取 $j_4 = 4$, 第 3 行中的元素除 a_{33}, a_{34} 外都是 0, 现已取 $j_4 = 4$, 只需取 $j_3 = 3$. 同理, 只需取 $j_2 = 2$, $j_1 = 1$. 于是这个行列式的展开式中不为 0 的项只可能是 $a_{11} a_{22} a_{33} a_{44}$, 而排列 1234 的逆序数是 0, 所以 $D = a_{11} a_{22} a_{33} a_{44}$.

同理, 可以证得对一般的上三角(形)行列式(主对角线以下元素都为 0), 有

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ & & \ddots & \vdots \\ & & & a_{nn} \end{vmatrix} = a_{11} a_{22} \cdots a_{nn},$$

对一般的下三角(形)行列式(主对角线以上的元素都为 0), 有

$$\begin{vmatrix} a_{11} & & & \\ a_{21} & a_{22} & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix} = a_{11} a_{22} \cdots a_{nn},$$

类似可得,对次对角线以下(上)元素都为0的行列式,有

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

$$= (-1)^{r(n \cdots 21)} a_{1n} a_{2,n-1} \cdots a_{n1} = (-1)^{\frac{n(n-1)}{2}} a_{1n} a_{2,n-1} \cdots a_{n1}.$$

§ 1.3 行列式的展开

一、行列式按一行(列)展开

定义 1.4 在 n 阶行列式 D 中,把元素 a_{ij} 所在的第 i 行和第 j 列划去后,余下的元素按照原来的顺序组成的 $n-1$ 阶行列式 M_{ij} ,叫做元素 a_{ij} 的余子式,而将 $A_{ij} = (-1)^{i+j} M_{ij}$ 叫做元素 a_{ij} 的代数余子式.

例如在三阶行列式 $\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}$ 中,元素 a_{23} 的余子式为 $M_{23} = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{31} & a_{32} \end{vmatrix}$,

代数余子式为 $A_{23} = (-1)^{2+3} M_{23} = - \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{31} & a_{32} \end{vmatrix}$. 元素 a_{31} 的余子式为 $M_{31} =$

$\begin{vmatrix} a_{12} & a_{13} \\ a_{22} & a_{23} \end{vmatrix}$, 代数余子式为 $A_{31} = (-1)^{3+1} M_{31} = \begin{vmatrix} a_{12} & a_{13} \\ a_{22} & a_{23} \end{vmatrix}$.

观察三阶行列式知

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

即三阶行列式等于它的第一行各元素与其对应的代数余子式乘积之和. 还可以验证,三阶行列式等于它的任一行(列)的各元素与其对应的代数余子式乘积

之和.

一般的,有

定理 1.2 n 阶行列式 $D = \Delta(a_{ij})$ 等于它的任一行(列)的各元素,与其对应的代数余子式乘积之和,即

$$D = a_{i1}A_{i1} + a_{i2}A_{i2} + \cdots + a_{in}A_{in} \quad (i=1, 2, \cdots, n) \quad (1.9)$$

或
$$D = a_{1j}A_{1j} + a_{2j}A_{2j} + \cdots + a_{nj}A_{nj} \quad (j=1, 2, \cdots, n). \quad (1.10)$$

这个定理叫做行列式按行(列)展开法则. 利用这一定理可将行列式降阶, 从而简化行列式的运算.

我们称(1.9)式为行列式 D 按第 i 行的展开式; 称(1.10)式为行列式 D 按第 j 列的展开式.

例 1.4 计算 n 阶行列式

$$D_n = \begin{vmatrix} x & y & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & x & y & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & x & y \\ y & 0 & 0 & \cdots & 0 & x \end{vmatrix}.$$

解 将 D_n 按第 1 列展开得

$$\begin{aligned} D_n &= x \begin{vmatrix} y & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & x & y & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & x & y \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & x \end{vmatrix} + (-1)^{n+1} y \begin{vmatrix} y & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ x & y & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & x & y \end{vmatrix} \\ &= x^n + (-1)^{n+1} y^n. \end{aligned}$$

(式中行列式符号 $\begin{vmatrix} \end{vmatrix}$ 的右下标 $n-1$ 表示它的阶数).

二、行列式按某 k 行(k 列)展开

1. k 阶子式、 k 阶子式的余子式及代数余子式

定义 1.5 在一 n 阶行列式 $D = \Delta(a_{ij})$ 中任意选定 k 行 k 列 ($1 \leq k \leq n-1$), 位于这些行和列的交点上的 k^2 个元素, 按照原来的顺序组成一个 k 阶行列式 M , 称 M 为行列式 D 的一个 k 阶子式. 在 D 中划去这 k 行 k 列后余下的元素按照原来的顺序组成的 $n-k$ 阶行列式 N 称为 k 阶子式 M 的余子式. 若 D 的 k 阶子式 M 在 D 中所在的行、列指标分别为 $i_1, i_2, \cdots, i_k$ 及 $j_1, j_2, \cdots, j_k$, 则称

$$A = (-1)^{i_1+i_2+\cdots+i_k+j_1+j_2+\cdots+j_k} N$$

为 k 阶子式 M 的代数余子式.

例如在四阶行列式 $D = \begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 5 & 6 & 7 & 8 \\ -1 & -2 & 0 & 7 \\ 8 & 2 & -3 & 0 \end{vmatrix}$ 中,若选定第一、第四行;第二、第

三列,则得到 D 的一个二阶子式 $M_1 = \begin{vmatrix} 2 & 3 \\ 2 & -3 \end{vmatrix}$, M_1 的余子式为 $N_1 = \begin{vmatrix} 5 & 8 \\ -1 & 7 \end{vmatrix}$, M_1

的代数余子式为 $A_1 = (-1)^{1+4+2+3} \begin{vmatrix} 5 & 8 \\ -1 & 7 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 5 & 8 \\ -1 & 7 \end{vmatrix}$.

若选定第一、第四行;第一、第三列,则得到 D 的一个二阶子式 $M_2 =$

$\begin{vmatrix} 1 & 3 \\ 8 & -3 \end{vmatrix}$, M_2 的余子式为 $N_2 = \begin{vmatrix} 6 & 8 \\ -2 & 7 \end{vmatrix}$, M_2 的代数余子式为

$$A_2 = (-1)^{1+4+1+3} \begin{vmatrix} 6 & 8 \\ -2 & 7 \end{vmatrix} = - \begin{vmatrix} 6 & 8 \\ -2 & 7 \end{vmatrix}.$$

2. 拉普拉斯(Laplace)定理

定理 1.3 (拉普拉斯定理) 在 n 阶行列式 D 中任意选定 $k (1 \leq k \leq n-1)$ 行(或列),由这 k 行(或列)元素组成的一切 k 阶子式与它们对应的代数余子式的乘积之和等于行列式 D .

如:在 $\begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 5 & 6 & 7 & 8 \\ -1 & -2 & 0 & 7 \\ 8 & 2 & -3 & 0 \end{vmatrix}$ 中,选定第一、第四行,由定理 1.3 可得

$$\begin{aligned} \begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 5 & 6 & 7 & 8 \\ -1 & -2 & 0 & 7 \\ 8 & 2 & -3 & 0 \end{vmatrix} &= \begin{vmatrix} 1 & 2 \\ 8 & 2 \end{vmatrix} \times (-1)^{1+4+1+2} \begin{vmatrix} 7 & 8 \\ 0 & 7 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 1 & 3 \\ 8 & -3 \end{vmatrix} \times (-1)^{1+4+1+3} \begin{vmatrix} 6 & 8 \\ -2 & 7 \end{vmatrix} \\ &+ \begin{vmatrix} 1 & 4 \\ 8 & 0 \end{vmatrix} \times (-1)^{1+4+1+4} \begin{vmatrix} 6 & 7 \\ -2 & 0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 2 & 3 \\ 2 & -3 \end{vmatrix} \times (-1)^{1+4+2+3} \begin{vmatrix} 5 & 8 \\ -1 & 7 \end{vmatrix} \\ &+ \begin{vmatrix} 2 & 4 \\ 2 & 0 \end{vmatrix} \times (-1)^{1+4+2+4} \begin{vmatrix} 5 & 7 \\ -1 & 0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 3 & 4 \\ -3 & 0 \end{vmatrix} \times (-1)^{1+4+3+4} \begin{vmatrix} 5 & 6 \\ -1 & -2 \end{vmatrix}. \end{aligned}$$

拉普拉斯定理又称为行列式按某 k 行(列)的展开式.它是行列式按某一行(列)展开定理的推广.当行列式含有大量的零元素时,利用此定理计算较方便.

例 1.5 计算行列式

$$D = \begin{vmatrix} a_1 & 0 & 0 & b_1 \\ 0 & a_2 & b_2 & 0 \\ 0 & c_2 & d_2 & 0 \\ c_1 & 0 & 0 & d_1 \end{vmatrix}.$$

解 利用拉普拉斯定理,将 D 按第一、四行展开,得

$$D = \begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ c_1 & d_1 \end{vmatrix} \times (-1)^{1+4+1+4} \begin{vmatrix} a_2 & b_2 \\ c_2 & d_2 \end{vmatrix} = (a_1 d_1 - b_1 c_1)(a_2 d_2 - b_2 c_2)$$

例 1.6 计算行列式

$$D = \begin{vmatrix} 2 & 2 & 0 & 0 \\ 5 & 6 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & 0 & 7 \\ 8 & 2 & -3 & 0 \end{vmatrix}.$$

解 利用拉普拉斯定理,将 D 按第一、第二行展开,得

$$D = \begin{vmatrix} 2 & 2 & 0 & 0 \\ 5 & 6 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & 0 & 7 \\ 8 & 2 & -3 & 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 2 & 2 \\ 5 & 6 \end{vmatrix} \times (-1)^{1+2+1+2} \begin{vmatrix} 0 & 7 \\ -3 & 0 \end{vmatrix} = 2 \times 21 = 42.$$

类似的,利用拉普拉斯定理,可得如下结果:

$$\begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1k} & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{k1} & \cdots & a_{kk} & 0 & \cdots & 0 \\ c_{11} & \cdots & c_{1k} & b_{11} & \cdots & b_{1s} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ c_{s1} & \cdots & c_{sk} & b_{s1} & \cdots & b_{ss} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1k} & c_{11} & \cdots & c_{1s} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{k1} & \cdots & a_{kk} & c_{k1} & \cdots & c_{ks} \\ 0 & \cdots & 0 & b_{11} & \cdots & b_{1s} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & b_{s1} & \cdots & b_{ss} \end{vmatrix}$$

$$= \begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1k} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{k1} & \cdots & a_{kk} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} b_{11} & \cdots & b_{1s} \\ \vdots & & \vdots \\ b_{s1} & \cdots & b_{ss} \end{vmatrix}.$$

一般,常可将上述结果简记为 $\begin{vmatrix} A & O \\ C & B \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A & C \\ O & B \end{vmatrix} = |A| |B|.$

并称上式为四分块下(上)三角行列式的计算公式.

§ 1.4 行列式的性质

在本节中,我们设