

— 高等学校教材 —

线性代数

西北工业大学应用数学系线性代数教学组 编

Linear Algebra

西北工业大学出版社

高等学校教材

线 性 代 数

西北工业大学应用数学系线性代数教学组 编

西北工业大学出版社

(陕)新登字 009 号

【内容简介】 本书共分八章,内容包括行列式,矩阵及其运算,矩阵的初等变换,向量组的线性相关性,矩阵的相似变换,二次型,线性空间与线性变换,线性代数应用举例等。各章后均配有适量的习题,书后附有参考答案。另外还专门编有与本书配套的作业集。

本书便于教学与自学,可作为高等院校工科和经济学科各专业的教材,也可供科技工作者参考。

高等学校教材
线性代数

西北工业大学应用数学系线性代数教学组 编

责任编辑 冷国伟

责任校对 耿明丽

*

©1999 西北工业大学出版社出版发行

(邮编:710072 西安市友谊西路127号 电话:8491147)

陕西新华书店经销

西安正华印刷厂印装

ISBN 7-5612-1129-5/O·151(课)

*

开本:850毫米×1168毫米 1/32 印张:8 字数:119千字

1999年6月第1版

1999年6月第1次印刷

印数:1—6000册

定价:11.00元

购买本社出版的图书,如有缺页、错页的,本社发行部负责调换。

前 言

线性代数是高等学校理工科和经济学科有关专业的一门数学基础课,它不但是其他数学课程的基础,也是物理、力学、电路等课程的基础。实际上,任何与数学有关的课程都涉及到线性代数知识。另外,由于计算机的飞速发展和广泛应用,使得许多实际问题可以通过离散化的数值计算得到定量的解决,于是作为处理离散问题工具的线性代数,也是从事科学研究和工程设计的科技人员必备的数学基础。

本书是在原《线性代数》讲义的基础上几经修改、使用、编写而成的。内容包括:行列式,矩阵及其运算,矩阵的初等变换,向量组的线性相关性,矩阵的相似变换,二次型,线性空间与线性变换,线性代数应用举例等。主要特点是:

1. 层次分明,适用面广。全书由基础部分(第一~六章不带“*”号部分)、提高部分(带“*”号部分)和应用部分(第八章)三个模块组成。基础模块是按国家教委制订的高等工业学校《线性代数课程教学基本要求》编写的,包括了线性代数的主要内容和基本计算方法,讲授这部分约需 36 学时;提高模块是对前面所学内容的综合应用与提高,可供较高学时(如 48 学时)使用和有余力的学生阅读;应用模块可穿插到有关章节中讲解或作为学生的课外阅读材料。因此,本书不但适合工科本科生少学时与多学时线性代数课程的教学需要,也适于专科生的教学需要。

2. 分散难点,提高素质。线性代数所使用的各种推证方法,公

理化定义,抽象化思维,计算与运算技巧及应用能力等都很具有特色,是其他课程所无法替代的,是提高学生数学素质不可缺少的一环。为了既能够有适当的理论深度,又能便于理解,我们对于一般线性代数中教学难度较大的内容作了适当处理。例如,对于线性相关性这个线性代数中重要的概念和难点,采取了先介绍矩阵的初等变换及求线性方程组的消元法,从而将向量组线性相关与否的问题转化为某个齐次方程组有无非零解的问题,使它较为具体;对各章内容的许多细节处理,也是颇有特色的。

3. 突出矩阵,加强空间。矩阵这一数学概念能够与工程技术问题相结合并成为表达手段,主要依赖于它的种种运算和变换。本书除了介绍矩阵的各种运算外,还突出了矩阵的三大变换,即初等变换、相似变换与合同变换。对于线性方程组这一线性代数研究的基本内容,虽未单列一章,但它贯穿于全书的始终。线性空间理论无疑是现代数学的必备基础和强有力的工具,本书适当加强了这部分内容,以满足工科学生更多层次的使用要求。

4. 题目典型,教辅配套。每章配有一定数量的例题与习题,这些题目是经过精选的,其中不少具有新意,书未附有习题答案与提示。另外,还有《线性代数典型题分析解集》(西北工业大学出版社,1998. 6.)和《线性代数作业集》与本书配套。这样,既提供了各种题型供学生练习,也减轻了教师批改作业的工作量。

在编写过程中,我们力求做到叙述清晰,推证严谨,深入浅出,通俗易懂,使之便于教学与自学。

参加本书编写的有刘克轩(第一章)、蒋大为(第二章)、徐仲(第三、七章)、张凯院(第四章)、彭国华(第五章)、李信真(第六章)和吕全义(第八章)。全书由徐仲统稿并负责修改定稿。本书在编

写过程中,得到了西北工业大学应用数学系领导及同事的关心和支持。盛德成教授仔细审阅了书稿并提出了许多宝贵意见;西北工业大学出版社、教务处也对本书的出版给予了很大的支持和帮助,在此一并表示衷心的感谢。

由于水平所限,书中疏漏和不妥之处,恳请同行、读者指正。

编 者

1998 年 6 月于西北工业大学

目 录

第一章 行列式	1
§ 1.1 二、三阶行列式	1
§ 1.2 排列及其逆序数	5
§ 1.3 n 阶行列式定义	7
§ 1.4 行列式的性质	11
§ 1.5 行列式按行(列)展开	18
* § 1.6 拉普拉斯定理	26
§ 1.7 克莱姆法则	29
一、线性方程组的概念	29
二、克莱姆法则	30
习题一	34
第二章 矩阵及其运算	38
§ 2.1 矩阵的概念	38
§ 2.2 矩阵的基本运算	41
一、矩阵的线性运算	41
二、矩阵乘法	43
三、方阵的幂	46
四、矩阵的转置	47
五、方阵的行列式	50

六、共轭矩阵	51
§ 2.3 逆矩阵	52
§ 2.4 分块矩阵	57
习题二	63
第三章 矩阵的初等变换	68
§ 3.1 矩阵的秩	68
§ 3.2 矩阵的初等变换	69
§ 3.3 求解线性方程组的消元法	73
§ 3.4 初等方阵	81
* § 3.5 分块初等方阵及其应用	86
习题三	89
第四章 向量组的线性相关性	92
§ 4.1 向量及其运算	92
§ 4.2 向量组的线性相关性	95
一、线性相关与线性无关	95
二、线性相关性的判别定理	98
§ 4.3 向量组的秩与极大无关组	103
一、秩与极大无关组	103
二、等价向量组	105
§ 4.4 向量空间	107
一、向量空间的概念	107
二、正交基	110
三、基变换与坐标变换	112
§ 4.5 线性方程组解的结构	115

一、齐次线性方程组	116
二、非齐次线性方程组	118
习题四	120
第五章 矩阵的相似变换	125
§ 5.1 方阵的特征值与特征向量	125
§ 5.2 相似对角化	131
一、相似矩阵	131
二、相似对角化的条件	132
§ 5.3 实对称矩阵的相似矩阵	137
一、实对称矩阵的特征值与特征向量	137
二、正交矩阵	138
三、实对称矩阵正交相似于对角矩阵	139
* § 5.4 哈密尔顿-凯莱定理	144
习题五	146
第六章 二次型	149
§ 6.1 二次型及其矩阵表示	149
§ 6.2 化二次型为标准形	152
一、正交变换法	153
二、配方法	155
* 三、初等变换法	157
§ 6.3 正定二次型	160
习题六	162

*第七章 线性空间与线性变换	165
§ 7.1 线性空间的定义与基本性质	165
§ 7.2 维数、基与坐标	170
一、维数与基	170
二、坐标	171
三、基变换与坐标变换公式	173
§ 7.3 线性子空间	175
一、子空间的概念	175
二、子空间的交与和	177
三、子空间的直和	179
§ 7.4 线性变换	181
一、映射与变换	181
二、线性变换的定义与基本性质	182
三、线性变换的值域与核	184
四、线性变换的运算	187
§ 7.5 线性变换的矩阵表示	189
一、线性变换的矩阵	189
二、线性变换的特征值与特征向量	194
§ 7.6 欧氏空间	198
一、欧氏空间的概念	198
二、标准正交基	203
三、正交子空间	205
四、正交变换	207
习题七	209

第八章 线性代数应用举例.....	215
§ 8.1 线性方程组的应用	215
一、求微分方程数值解	215
二、最小二乘法	217
三、电路网络分析	220
§ 8.2 矩阵相似对角化的应用	222
一、生物遗传问题	222
二、求解微分方程组	224
§ 8.3 实二次型理论的应用	225
一、化简二次曲面方程	225
二、多元函数极值的判定	227
习题答案与提示.....	230
参考文献.....	245

第一章 行列式

行列式是线性代数中的一个基本概念,其理论起源于解线性方程组,它在自然科学的许多领域里都有广泛的应用.本章主要介绍 n 阶行列式的定义、性质和计算方法以及用行列式解线性方程组的克莱姆(Cramer)法则.

§ 1.1 二、三阶行列式

考虑二元一次方程组

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 = b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 = b_2 \end{cases} \quad (1.1)$$

的求解. 当 $a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21} \neq 0$ 时,由消元法得方程组的惟一解

$$x_1 = \frac{b_1a_{22} - b_2a_{12}}{a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}}, \quad x_2 = \frac{a_{11}b_2 - a_{21}b_1}{a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}} \quad (1.2)$$

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,它表示数 $a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}$,即

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

如果把 a_{11}, a_{22} 的连线称为二阶行列式的主对角线,把 a_{12}, a_{21} 的连线称为次对角线,则二阶行列式的值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,二元一次方程组(1.1)的解(1.2)可用二阶行列式表示成

$$x_1 = \frac{\begin{vmatrix} b_1 & a_{12} \\ b_2 & a_{22} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix}}, \quad x_2 = \frac{\begin{vmatrix} a_{11} & b_1 \\ a_{21} & b_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix}}$$

这样用行列式来表示解,形状简单,容易记忆,称为二元一次方程组的行列式解法.

类似地,对一般的三元一次方程组

$$\left. \begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 &= b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 &= b_2 \\ a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}x_3 &= b_3 \end{aligned} \right\} \quad (1.4)$$

利用加减消元法可以得到

$$\begin{aligned} &(a_{11}a_{22}a_{33} + a_{12}a_{23}a_{31} + a_{13}a_{21}a_{32} - \\ &\quad a_{13}a_{22}a_{31} - a_{12}a_{21}a_{33} - a_{11}a_{23}a_{32})x_1 = \\ &\quad b_1a_{22}a_{33} + a_{12}a_{23}b_3 + a_{13}b_2a_{32} - \\ &\quad a_{13}a_{22}b_3 - a_{12}b_2a_{33} - b_1a_{23}a_{32} \end{aligned}$$

当 x_1 的系数

$$\begin{aligned} D &= a_{11}a_{22}a_{33} + a_{12}a_{23}a_{31} + a_{13}a_{21}a_{32} - \\ &\quad a_{13}a_{22}a_{31} - a_{12}a_{21}a_{33} - a_{11}a_{23}a_{32} \neq 0 \end{aligned}$$

时可解得

$$\begin{aligned} x_1 &= \frac{1}{D}(b_1a_{22}a_{33} + a_{12}a_{23}b_3 + a_{13}b_2a_{32} - \\ &\quad a_{13}a_{22}b_3 - a_{12}b_2a_{33} - b_1a_{23}a_{32}) \end{aligned}$$

同样可求得

$$\begin{aligned} x_2 &= \frac{1}{D}(a_{11}b_2a_{33} + b_1a_{23}a_{31} + a_{13}a_{21}b_3 - \\ &\quad a_{13}b_2a_{31} - b_1a_{21}a_{33} - a_{11}a_{23}b_3) \\ x_3 &= \frac{1}{D}(a_{11}a_{22}b_3 + a_{12}b_2a_{31} + b_1a_{21}a_{32} - \\ &\quad b_1a_{22}a_{31} - a_{12}a_{21}b_3 - a_{11}b_2a_{32}) \end{aligned}$$

与二元一次方程组类似,为了便于记忆,引入记号

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} \stackrel{\text{def}}{=} a_{11}a_{22}a_{33} + a_{12}a_{23}a_{31} + a_{13}a_{21}a_{32} - a_{13}a_{22}a_{31} - a_{12}a_{21}a_{33} - a_{11}a_{23}a_{32} \quad (1.5)$$

上式左端的记号称为三阶行列式,它代表右端六项的代数和,其中 $a_{ij} (i, j = 1, 2, 3)$ 为三阶行列式的第 i 行第 j 列上的元素,且称 i 为行指标, j 为列指标.

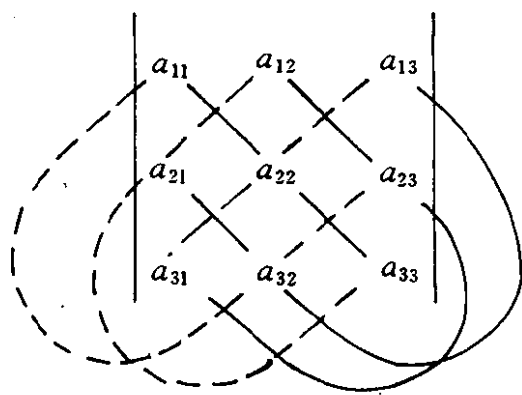


图 1.1 三阶行列式的对角线法则

对于式(1.5)的右端项,可用图 1.1 的方法记忆. 图中实线上三个元素的乘积组成的三项取正号,虚线上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.

引入三阶行列式后,三元一次方程组(1.4)当 $D \neq 0$ 时有惟一解

$$x_1 = \frac{D^{(1)}}{D}, \quad x_2 = \frac{D^{(2)}}{D}, \quad x_3 = \frac{D^{(3)}}{D}$$

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 (1.4) 的系数行列式, 而 $D^{(1)}, D^{(2)}, D^{(3)}$ 是将 D 中第 1, 2, 3 列分别换成常数项 b_1, b_2, b_3 得到的三阶行列式. 这就是三元一次方程组的行列式解法.

例 1.1 用行列式解方程组

$$\begin{cases} x_1 - 2x_2 - x_3 = 1 \\ \quad \quad 3x_2 + 2x_3 = 1 \\ 3x_1 + x_2 - x_3 = 0 \end{cases}$$

解 系数行列式

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

由于 $D \neq 0$, 方程组有惟一解. 又

$$D^{(1)} = \begin{vmatrix} 1 & -2 & -1 \\ 1 & 3 & 2 \\ 0 & 1 & -1 \end{vmatrix} = -8$$

$$D^{(2)} = \begin{vmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 0 & 1 & 2 \\ 3 & 0 & -1 \end{vmatrix} = 8$$

$$D^{(3)} = \begin{vmatrix} 1 & -2 & 1 \\ 0 & 3 & 1 \\ 3 & 1 & 0 \end{vmatrix} = -16$$

所以方程组的解为

$$x_1 = \frac{D^{(1)}}{D} = 1, \quad x_2 = \frac{D^{(2)}}{D} = -1, \quad x_3 = \frac{D^{(3)}}{D} = 2$$

从以上讨论自然会想到, 对于 n 个未知数 n 个一次方程的方程组, 它的解是否也能用 n 阶行列式来表示? 若能, 如何来定义

n 阶行列式呢?显然,当 n 较大时用上述类似的消元法是无法推导的. 解决的思路是:先研究排列及其性质,再观察二、三阶行列式的表达式,寻找新的规律,然后按这些规律来定义 n 阶行列式.

§ 1.2 排列及其逆序数

为了定义高阶行列式,需要介绍排列的有关概念.

定义 1.1 把 n 个不同元素排成一列,叫做这 n 个元素的一个全排列,简称排列.

n 个不同元素构成的所有全排列的总数为 $n(n-1)\cdots 2\cdot 1 = n!$.

这里主要讨论 n 个不同的自然数的排列,且把这 n 个数从小到大的排列称为标准排列或自然排列. 显而易见,对于 n 个不同的自然数,除标准排列外,其它的排列都或多或少地破坏了从小到大这一排列次序. 为了确切地说明这一问题,给出如下定义.

定义 1.2 在 n 个不同的自然数组成的排列 $p_1 p_2 \cdots p_n$ 中,如果某两个数不是自然顺序,即前面一个数大于后面一个数,则称这两个数构成一个逆序. 该排列中逆序的总个数称为这个排列的逆序数,记作 $\tau(p_1 p_2 \cdots p_n)$.

求排列 $p_1 p_2 \cdots p_n$ 的逆序数,可从第二个元素开始,依次观察 $p_i (i = 2, 3, \cdots, n)$ 与其前面的数构成的逆序个数,不妨设为 τ_i (即前面有 τ_i 个数比 p_i 大),则排列 $p_1 p_2 \cdots p_n$ 的逆序数为

$$\tau(p_1 p_2 \cdots p_n) = \tau_2 + \tau_3 + \cdots + \tau_n$$

例 1.2 求下列排列的逆序数

$$(1) 6\ 3\ 7\ 2\ 4\ 5\ 1; \quad (2) 1\ 3\ 7\ 2\ 4\ 5\ 6$$

解 (1) 易看出

$$\tau_2 = 1, \quad \tau_3 = 0, \quad \tau_4 = 3, \quad \tau_5 = 2, \quad \tau_6 = 2, \quad \tau_7 = 6$$

所以逆序数 $\tau(6\ 3\ 7\ 2\ 4\ 5\ 1) = \sum_{i=2}^7 \tau_i = 14$

(2) 显然 $\tau_2 = 0, \tau_3 = 0, \tau_4 = 2, \tau_5 = 1, \tau_6 = 1, \tau_7 = 1$

所以逆序数 $\tau(1\ 3\ 7\ 2\ 4\ 5\ 6) = \sum_{i=2}^7 \tau_i = 5$

定义 1.3 逆序数为奇数的排列称为奇排列, 逆序数为偶数的排列称为偶排列.

据此定义, 例 1.2 中的排列(1)为偶排列, 而排列(2)为奇排列.

定义 1.4 在一个排列中, 将某两个数的位置对调, 而其余数不动, 即可得一新的排列, 这一过程称为对换.

比较例 1.2 中的两个排列, 可见排列 1 3 7 2 4 5 6 是由排列 6 3 7 2 4 5 1 经过 6 与 1 的对换得到的. 从该例还可发现, 排列经过一次对换后奇偶性发生了变化. 一般有下列的结论.

定理 1.1 排列经一次对换, 其奇偶性改变.

证 (1) 相邻对换情形. 设一排列为

$$a_1 a_2 \cdots a_l a b b_1 b_2 \cdots b_m$$

其逆序数为 t_1 . 将 a 与 b 位置对调, 即经一次相邻对换得新排列

$$a_1 a_2 \cdots a_l b a b_1 b_2 \cdots b_m$$

若记该排列的逆序数为 t_2 , 于是当 $a > b$ 时, $t_2 = t_1 - 1$; 而当 $a < b$ 时, $t_2 = t_1 + 1$. 故经一次相邻对换后排列的奇偶性发生改变.

(2) 一般情形. 设排列为

$$a_1 a_2 \cdots a_l a b_1 \cdots b_m b c_1 \cdots c_n \quad (1.6)$$

将 a 与 b 对调得新排列

$$a_1 a_2 \cdots a_l b b_1 \cdots b_m a c_1 \cdots c_n \quad (1.7)$$

排列(1.7)可看作是先由排列(1.6)把 a 依次与 $b_1, b_2, \cdots, b_m$ 对调, 即作 m 次相邻对换得排列

$$a_1 a_2 \cdots a_l b_1 \cdots b_m a b c_1 \cdots c_n \quad (1.8)$$